



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

VÝZKUM TECHNOLOGIE ZPĚTNÉHO VYUŽITÍ
ZEMIN VE FORMĚ SAMOZHUTNITELNÝCH
ZÁLIVEK
RESEARCH OF SOIL REUSE TECHNOLOGY IN THE FORM OF SELF-COMPACTING
GROUTS

DISERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. Magdaléna Michalčíková

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. ROSTISLAV DROCHYTKA, CSc., MBA

BRNO 2019

ABSTRAKT

Vzrůstající objem odpadů všeho druhu je v současnosti jevem ekonomicky rozvinuté společnosti a současně jedním z problémů ochrany životního prostředí. Je proto nezbytně nutné, v zájmu trvale udržitelného rozvoje, sledovat vlivy související s dopadem na naši ekologii, legislativně regulovat produkci odpadů a všestranně podporovat jejich recyklaci a další využití. Stavební a demoliční odpad zaujímá významný podíl z celkového objemu odpadů. Do této kategorie patří i zeminy z výkopových prací. Recyklace těchto materiálů by mohla výrazně omezit množství skládkovaných odpadů a zároveň by tyto materiály mohly být využity jako významný zdroj druhotných surovin. Disertační práce popisuje výzkum a vývoj nové technologie zpětného využití zemin ve formě samozhutnitelné zálivky. Výsledkem řešení bude suspenze optimálních reologických vlastností, zabezpečující dokonalé obtékání uložených inženýrských sítí. Důraz bude kladen na studium spolupůsobení různých typů zemin se stabilizátory, ztekucujícími či plastifikačními přísadami a jim typickou dispergovatelnou látkou, včetně ověření vyvinuté technologie in situ.

KLÍČOVÁ SLOVA

Zemina, výkopové práce, odpad, recyklace, stabilizace, samozhutnitelná zálivka, ztekucení, vápno, cement, ztekucující a plastifikační přísada.

ABSTRACT

The increasing volume of waste of all kinds is currently a phenomenon of economically developed society and one of the problems of environmental protection. It is therefore imperative, in the interest of sustainable development, to monitor impacts related to the impact on our ecology, to regulate waste production by legislation and universally promote their reuse and recycling. Construction and demolition waste occupy a significant share of the total waste volume. This category also includes excavated soils. Recycling of these materials could significantly reduce the amount of landfilled waste and at the same time, these materials could be used as an important source of secondary raw materials. The doctoral thesis describes the research and development of the new technology of reuse soils in the form of self-compacting grouts. The result of the solution will be a suspension of optimal rheological properties, providing a perfect leaking around the stored utility networks. Emphasis will be placed on the study of the interaction of different types of soils with the stabilizers, flowable or plasticizing additives and its typical dispersible substance, including verification of the developed technology in situ.

KEYWORDS

Soil, excavation work, waste, recycling, stabilization, self-compacting grout, flowability, lime, cement, flowable and plasticizing additive.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Ing. Magdaléna Michalčíková *Výzkum technologie zpětného využití zemin ve formě samozhutnitelných zálivek*. Brno, 2019. 232 s., 47 s. příl. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem disertační práci s názvem Výzkum technologie zpětného využití zemin ve formě samozhutnitelných zálivek zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 22. 2. 2019

Ing. Magdaléna Michalčíková
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucímu mé disertační práce prof. Ing. Rostislavu Drochytzkovi, CSc., MBA za jeho odborné vedení a cenné rady při zpracování této práce. Dále bych chtěla poděkovat kolektivu Ústavu technologie stavebních hmot a dílců, zejména Ing. Vítu Černému, Ph.D. V neposlední řadě patří velké poděkování mé rodině a manželovi za soustavnou podporu.

Poděkování také patří Centru AdMaS za možnost využití přístrojového vybavení a Ministerstvu průmyslu a obchodu za finanční podporu z prostředků státního rozpočtu, jejichž část byla využita k provedení některých analýz v rámci řešení projektu FV10118 „Progresivní bezodpadová technologie zpětného využití zemin ve formě samozhutnitelných zálivek“.

OBSAH

ÚVOD	9
I. TEORETICKÁ ČÁST.....	11
1 SHRUTÍ STÁVAJÍCÍCH POZNATKŮ	11
1.1 GEOLOGIE ZEMIN	11
1.1.1 Technické požadavky a charakteristika zemin.....	12
1.1.2 Zeminy jako součást základových půd	18
1.1.3 Požadavky pro práci se zeminou z výkopových prací	21
1.1.4 Ohlášení a stavební povolení výkopových prací.....	23
1.1.5 Provádění vlastních zemních prací	24
1.1.6 Předúprava zemin pro možnost jejich použití.....	28
1.2 ÚPRAVA ZEMIN	33
1.2.1 Stabilizace zemin	35
1.2.2 Vliv vápna na stabilizaci zemin	37
1.2.3 Vliv cementu na stabilizaci zemin	43
1.2.4 Další druhy stabilizace zemin	46
1.3 SAMOZHUTNITELNÉ ZÁLIVKY	48
1.3.1 Typy samozhutnitelných zálivek	49
1.3.2 Charakteristika samozhutnitelných zálivek	49
1.3.3 Specifikace materiálů pro samozhutnitelné zálivky.....	52
1.3.4 Výhody použití samozhutnitelných zálivek	57
1.3.5 Použití a aplikace samozhutnitelných zálivek	59
2 CÍLE PRÁCE	62
II. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	63
3 METODIKA PRÁCE	63
3.1 SPECIFIKACE JEDNOTLIVÝCH ETAP ŘEŠENÍ	63
3.1.1 Etapa I - Charakteristika vstupních surovin a návrh na úpravu zemin	63
3.1.2 Etapa II – Sledování vlivu stabilizačních činidel při návrhu samozhutnitelných zálivek	65
3.1.3 Etapa III – Sledování vlivu dalších druhů přísad a příměsí při návrhu samozhutnitelných zálivek	67
3.1.4 Etapa IV – Samozhutnitelné zálivky vs. stávající technologie, ověření vyvinuté technologie in situ	68
3.2 METODY PROVÁDĚNÝCH ZKOUŠEK	70
3.2.1 Stanovení sednutí-rozlitím	71
3.2.2 Stanovení objemové hmotnosti v čerstvém stavu	73
3.2.3 Stanovení dob tuhnutí	73
3.2.4 Stanovení objemové hmotnosti v zatvrdlém stavu	74
3.2.5 Stanovení pevnosti v tlaku	74

3.2.6	Stanovení smrštění	75
3.2.7	Stanovení vlhkosti	76
3.2.8	RTG analýza	76
3.2.9	DTA analýza	77
3.2.10	Mikroskopická analýza	77
4	VÝSLEDKY, VYHODNOCENÍ A JEJICH DISKUZE	79
4.1	ETAPA I - CHARAKTERISTIKA VSTUPNÍCH SUROVIN A NÁVRH NA ÚPRAVU ZEMIN	79
4.1.1	Charakteristika vybraných typů zemin	81
4.1.2	Návrh na úpravu zemin	87
4.1.3	Vlastnosti dalších surovin	89
4.1.3.1.	Vápno	90
4.1.3.2.	Cement	90
4.1.3.3.	Voda	91
4.1.3.4.	Plastifikační a ztekucující přísady	91
4.1.3.5.	Vedlejší energetické produkty	94
4.2	ETAPA II - SLEDOVÁNÍ VLIVU STABILIZAČNÍCH ČINIDEL PŘI NÁVRHU SAMOZHUTNITELNÝCH ZÁLIVEK	95
4.2.1	Ošetření zemin vápnem a cementem	95
4.2.2	Samozhutnitelné zálivky na bázi saCl	101
4.2.2.1.	Stanovení sednutí-rozlitím	101
4.2.2.2.	Stanovení objemové hmotnosti	104
4.2.2.3.	Stanovení pevnosti v tlaku	107
4.2.2.4.	Stanovení smrštění a vlhkosti	109
4.2.3	Samozhutnitelné zálivky na bázi fgrCSa	112
4.2.3.1.	Stanovení sednutí-rozlitím	113
4.2.3.2.	Stanovení objemové hmotnosti	115
4.2.3.3.	Stanovení pevnosti v tlaku	118
4.2.3.4.	Stanovení smrštění a vlhkosti	120
4.2.4	Samozhutnitelné zálivky na bázi Cl	122
4.2.4.1.	Stanovení sednutí-rozlitím	123
4.2.4.2.	Stanovení objemové hmotnosti	125
4.2.4.3.	Stanovení pevnosti v tlaku	127
4.2.4.4.	Stanovení smrštění a vlhkosti	129
4.2.5	Stanovení dob tuhnutí na vybraných směsích	131
4.2.6	Stanovení RTG difrakční analýzy na vybraných směsích	133
4.2.7	Stanovení DTA analýzy na vybraných směsích	135
4.2.8	Mikroskopická analýza vybraných samozhutnitelných zálivek	137

4.3 ETAPA III - SLEDOVÁNÍ Vlivu DALŠÍCH DRUHŮ PŘÍRAD A PŘÍMĚSÍ PŘI NÁVRHU SAMOZHUTNITELNÝCH ZÁLIVEK.....	143
4.3.1 Laboratorní testování a výběr dispergačních činidel	143
4.3.2 Sledování vlivu plastifikačních a ztekucujících přísad na zeminu saCl	147
4.3.2.1. Stanovení sednutí-rozlitím	148
4.3.2.2. Stanovení objemové hmotnosti	151
4.3.2.3. Stanovení pevnosti v tlaku	153
4.3.2.4. Stanovení smrštění a vlhkosti.....	156
4.3.3 Sledování vlivu plastifikační přísad na zeminu fgrCSa	158
4.3.3.1. Stanovení sednutí-rozlitím	159
4.3.3.2. Stanovení objemové hmotnosti	161
4.3.3.3. Stanovení pevnosti v tlaku	162
4.3.3.4. Stanovení smrštění a vlhkosti.....	164
4.3.4 Sledování vlivu plastifikačních a ztekucujících přísad na jíl Cl	165
4.3.4.1. Stanovení sednutí-rozlitím	166
4.3.4.2. Stanovení objemové hmotnosti	169
4.3.4.3. Stanovení pevnosti v tlaku	171
4.3.4.4. Stanovení smrštění a vlhkosti.....	174
4.3.5 Sledování vlivu vedlejších energetických produktů na samozhutnitelné zálivky	176
4.3.6 Stanovení dob tuhnutí na vybraných směsí.....	182
4.4 ETAPA IV - SAMOZHUTNITELNÉ ZÁLIVKY VS. STÁVAJÍCÍ TECHNOLOGIE, OVĚŘENÍ VYVINUTÉ TECHNOLOGIE IN SITU	190
4.4.1 Samozhutnitelné zálivky vs. stávající technologie	190
4.4.1.1. Příprava a aplikace samozhutnitelných zálivek.....	193
4.4.1.2. Výhody použití samozhutnitelných zálivek	198
4.4.1.3. Ekonomické a environmentální zhodnocení samozhutnitelných zálivek.....	201
4.4.2 Ověření vyvinuté technologie in situ	203
5 ZÁVĚR	207
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	210
SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ	218
SEZNAM TABULEK	221
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	222
SEZNAM PŘÍLOH	229

ÚVOD

Disertační práce se zabývá výzkumem využitelnosti zemin, které vznikají v rámci výkopových prací. Pozornost tomuto materiálu byla v disertační práci věnována především z toho důvodů, že produkce zemin z výkopových prací, z hlediska všech druhů odpadů, zaujímá značnou část (cca 65 %). Snahou tak bylo, i vzhledem k přicházejícím novým legislativním požadavkům, najít řešení problematiky spočívající nejenom v minimalizaci vzniku těchto zemin, ale také v jejich využití pro následnou stavební výrobu.

Podle nynější platné legislativy, zákona č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů, v platném znění [1], se ve většině případů s těmito zeminami zachází jako s odpadem. Je to díky vlastnostem zemin a proto, že se často stávají v místě stavby neupotřebitelnými. Mezi nežádoucí vlastnosti zemin patří především to, že jsou citlivé na ztekucení, měkké, obsahují vyšší množství organických látek atd. Z těchto důvodů není možné jejich zpětné využití v konstrukci, a proto často končí na skládkách odpadů, deponiích či mezideponiích.

Obecně lze z geotechnického hlediska říci, že nelze získat zeminu, která bude splňovat požadavky na konstrukci bez jakékoliv úpravy. Z tohoto důvodu je snahou hledat optimální technologie či způsoby, které vedou k dosažení zlepšení požadovaných parametrů zemin tak, aby bylo možné jejich zpětné využití v konstrukci. Při výběru technologie je vždy nutné si uvědomit, k jakému účelu bude zemina sloužit.

V dnešní praxi existuje celá řada technologií pro úpravu či ošetření zemin. Způsoby zlepšení vlastností zeminy lze rozdělit do dvou širokých kategorií, kterými je mechanická stabilizace (dosažena změnou fyzikálních vlastností půdních částic např. vibrací, hutněním bariérami, přibíjením atd.) a chemická stabilizace (dosažena chemickou reakcí mezi stabilizátorem/pojivem a minerálními látkami v zemině). Výzkumná činnost této disertační práce je zaměřena především na chemickou stabilizaci.

Mezi nejjednodušší mechanický stabilizační proces patří zhutnění a odvodnění zemin. Hutnění zemin se provádí za účelem zvýšení únosnosti, zamezení sesedání, předchází poškození mrazem, zlepšení stability a omezení propustnosti pro vodu. Odvodnění zemin se provádí především z toho důvodu, aby se zlepšila zpracovatelnost zemin (hlavně jílovitých). Vyšší množství vody totiž způsobuje lepení půdních částic dohromady, což znesnadňuje další zpracování zemin.

Nejznámější chemickou úpravou zemin je stabilizace. Stabilizace si klade za cíl upravit vlhkost zeminy a především zlepšit její pevnost, čímž se zvyšuje odolnost zeminy proti měknutí. Pro stabilizaci zemin se používá řada příměsí, z nichž nejpoužívanější jsou pojiva (vápno, cement). Přidáním příměsí k zeminám bývá často dosaženo zlepšení mnoha technických vlastností. Výsledné vlastnosti ošetřených zemin ovšem závisí na charakteru zeminy, na druhu a délce vytvrzování a na způsobu a kvalitě stavby. Přidání vápna k zemině přispívá ke zlepšení její zpracovatelnosti, ovšem ne ke zvýšení pevnosti. Vápno má zásadní vliv na množství vody v zemině, viskozitu a stabilizaci zemin. Pro stabilizaci zeminy se používají i jiné pojivové materiály, kterými jsou např. cement, popílek, bitumeny a jejich kombinace. Volba pojiva závisí na vlastnostech zeminy a jejím technickém použití. Zeminy stabilizované cementem mají vyšší pevnost [2]. Vyvíjená pevnost v tlaku je zřejmě ovlivněna množstvím cementového gelu vytvořeného v závislosti na množství spotřebovaného pojiva.

Ve skutečnosti by mělo být množství a druh přidaného pojiva v souladu s obsahem jílovitých minerálů v zemině. Přesné hodnoty množství a určení vlivu pojiva na zeminu je možné stanovit po provedení laboratorních testů.

Mezi netradiční možnosti úpravy zemin patří ztekucení. Jedná se o nový druh technologie, který není v nynější praxi znám. V České Republice se jedná o dosud zcela nepoužívanou technologii. V zahraničí je tato technologie popsána a realizována pouze výjimečně. Zmínky o zkušenostech s využíváním ztekucených zemin lze najít např. v Německu, Švýcarsku, Francii, Itálii, Velké Británii, USA a Japonsku. Principy ztekucení zemin jsou založeny na použití materiálů, kterými jsou např. stabilizátory (pojiva), ztekucovadla a případně alternativní suroviny. Konkrétní typy přísad, vzhledem k omezenému používání této technologie a tzv. „know how“, nejsou v praxi běžně známy. Zároveň pro technologii ztekucení zemin nejsou stanoveny přesné normové požadavky, podle kterých by bylo možné ověřovat jejich vlastnosti. Z těchto důvodů bylo snahou disertační práce se tématem ztekucení zemin a vývojem nové unikátní technologie samozhutnitelných zálivek na bázi zemin zabývat. Vzhledem k tomu, že se jedná o poměrně neznámou tematiku, vycházelo se při výzkumu a vývoji nové technologie úpravy zemin ze zkušeností s výrobou samozhutnitelných betonů a keramických výrobků.

Z výše zmíněných poznatků je cílem disertační práce výzkum a vývoj nové pokročilé technologie zpětného využití zemin ve formě samozhutnitelných zálivek pro výkopy inženýrských sítí, podkladní vrstvy vozovek či další stavební konstrukce, jež umožní dosažení vysoké konkurenceschopnosti na tuzemském i zahraničním trhu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 SHRNUÍ STÁVAJÍCÍCH POZNATKŮ

Před samotným zahájením výzkumných prací, z hlediska studie možnosti využitelnosti zemin z výkopových prací jakožto samozhutnitelných zálivek, bylo důležité si nejprve osvojit základní geologické termíny týkající se zemin, podle kterých je možné zeminu charakterizovat a klasifikovat, na základě čehož lze následně určit možnosti jejího použití. Ke studiu horninového prostředí je nutné znát a společně využívat informace z různých příbuzných vědních disciplín, jako je např. mineralogie, chemie a fyzika. [3]

Ve stavební praxi se nejčastěji dostáváme do styku s horninami, jakožto se základovou půdou, při výběru a hodnocení staveniště, kdy často geologické podmínky určují předpoklad pro výstavbu a z toho vyplývající způsob založení stavby [3]. Na základě znalostí horninového prostředí je možné následně odvozovat geotechnické vlastnosti, kterými je např. únosnost, stabilita, pevnost, rozpojitelnost a těžitelnost základové půdy spolu s chemickou povahou podzemní vody. Značné znalosti o horninovém prostředí musí mít především inženýři zabývající se podzemními stavbami, zakládáním velkých inženýrských a hydrogeologických staveb atd. Proto bylo i v zájmu této disertační práce se tématem geologie zemin (jejich charakteristikou, klasifikací a zařazením) zabývat.

1.1 Geologie zemin

Zhodnocení geologické situace na území České republiky slouží jako podklad pro získání přehledu o zeminách vyskytujících se na našem území. Na základě zjištěných poznatků lze následně vytipovat zeminy z různých lokalit a případně navrhnout vhodnou technologii úpravy.

Území České republiky je z regionálně geologického hlediska tvořeno dvěma velkými celky, kterými je *Český masiv* a *Západní Karpaty*. Tyto celky mají výrazně odlišnou geologickou minulost. Čechy a většina Moravy jsou součástí Českého masivu. Východní část Moravy a Slezska patří vnější okrajové části Západních Karpat. [4]

Stavba Českého masivu i Západních Karpat je složitá a dosud ne ve všech aspektech uspokojivě známá. Hlavní zásady pro regionální geologickou klasifikaci však byly přijaty a publikovány již v roce 1976, stejně jako konkrétní návrhy dělení Českého masivu a Západních Karpat [5, 6]. Názory jednotlivých geologů se ovšem často různí, proto existuje řada různých geologických rozdělení, které se od sebe mohou více či méně lišit.

Oblast **Českého masivu** lze podle Pospíšila [7, 8] obecně rozdělit na Českou křidu a Neovulkanity. Podle Přichystala a kol. [9] jsou tyto oblasti tvořeny jakožto komplex křídových křemenných pískovců (místy i opuky, břidlice, vápence a pískovce) a komplex pelitů – jílovců, slínovců až slínů nebo prachovců.

Karpatská soustava je regionálně-geologickým celkem mnohem mladší než Český masiv. Geologicky podle Pospíšila [7] tvoří Karpatská soustava tzv. flyšovou část, ve které se vyskytují převážně pískovce až slepence s jílovitými břidlicemi až jílovcí, tj. vrstvy s proměnlivou propustností a rozdílným pevnostním charakterem.

Na základě těchto geologických předpokladů lze tedy při provádění geotechnických prací očekávat výskyt určitých druhů zemin v konkrétních lokalitách. Pro to, aby tyto zeminy mohly být použity pro stavební účely, je nutné dále u zemin určit jejich technické parametry a charakteristické vlastnosti. Vzhledem k těmto parametrům je následně možné rozhodnout o tom, zda lze zeminy zpětně použít v konstrukci, v jejich přirozené podobě, či je nezbytná jejich úprava nebo vyřazení.

1.1.1 Technické požadavky a charakteristika zemin

Pro stavebnictví mají zeminy značný význam. Při splnění určitých technických požadavků mohou být totiž používány jako základní surovina pro stavební konstrukce. Splnění technických požadavků je dáno petrografií, mineralogií a strukturními parametry hornin. Z uvedeného tedy vyplývá, že základní znalosti, kterými je např. správné určení a popis vlastností, chování horninového prostředí a z toho správně vyvozené závěry, mohou ovlivnit náklady na zakládání staveb i výrobu stavebních materiálů.

Základová půda je podle Paška a kol. [10] definována jako část geologického prostředí, která je v interakci se stavební konstrukcí. Na tuto půdu působí vlivy vyvolané okolním prostředím a jsou do ní přenášeny účinky vyvolané stavbou [10]. Při využívání půd se ve stavební praxi proto vychází z normových požadavků, které musí splňovat. Základové půdy jsou obecně hodnoceny podle normy ČSN EN 1997-1 Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí - Část 1: Obecná pravidla [11], ČSN EN ISO 14688-1 Geotechnický průzkum a zkoušení - Pojmenování a zařizování zemin - Část 1: Pojmenování a popis [12], ČSN EN ISO 14688 – 2 Geotechnický průzkum a zkoušení - Pojmenování a zařizování zemin - Část 2: Zásady pro zařizování [13], ČSN EN ISO 17892-4 Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 4: Stanovení zrnitosti [14], ČSN EN ISO 14689

Geotechnický průzkum a zkoušení - Pojmenování, popis a klasifikace hornin [15], ČSN 73 6133 Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací [16].

Podle ČSN EN 1997-1 [11] rozlišujeme tři výchozí skupiny klasifikačního systému zemin:

- skupina F – zemin jemnozrné (8 tříd: F1 až F8),
- skupina S – zemin písčité (5 tříd: S1 až S5),
- skupina G – zemin štěrkovité (5 tříd: G1 až G5).

Mezi základní rozlišující znak zemin, podle norem ČSN EN ISO 14688-1 [12] a ČSN 73 6133 [16], patří jejich rozdělení podle **zrnitosti**. Podle velikosti částic se dle normy ČSN 73 6133 [16] rozlišují složky zeminy podle Tab. 1.

Tab. 1: Klasifikace složek zemin podle velikosti částic [16]

Částice	Popis	Označení	Rozsah
Velmi hrubé	Balvanitá složka	b	> 200 mm
	Kamenitá složka	cb	60 mm až 200 mm
Hrubé	Štěrkovitá složka	g	2 mm až 60 mm
	Písčítá složka	s	0,06 mm až 2 mm
Jemné (f)	Hlinitá složka	m	0,002 mm až 0,06 mm
	Jílovitá složka	c	< 0,002 mm
Velmi hrubé částice se při zařďování vyjmou, zaznamená se jejich hmotnostní podíl. Zbytek zeminy se klasifikuje podle dalších hledisek.			

Pro klasifikaci zemin se berou ze zrnitostního rozboru částice menší než 60 mm. To znamená, že velmi hrubé částice zeminy (> 60 mm) se při zařďování vyjmou a zaznamená se jejich celkový hmotnostní podíl v zemině. Zbytek zeminy se klasifikuje podle trojúhelníkového diagramu (Obr. 1). Za základní klasifikaci se uvažuje poměr zastoupení tří složek částic do 60 mm (g – s – f). Na základě jejich procentuálního zastoupení lze rozlišit výchozí skupiny zemin na *jemnozrné* (symbol F, po upřesnění jíl – symbol C, nebo hlína – symbol M), *písčité* (symbol S) a *štěrkovité* (symbol G).

Podrobnější rozdělení zrn a frakcí zemin, na základě něhož rozlišujeme základní skupiny zemin, je uvedeno v normě ČSN EN ISO 14688-1 [12] (viz Tab. 2). Charakterizace zemin podle zrnitosti a zrnitostních mezí může sloužit jako prvotní parametr, podle kterého lze předpokládat mechanické chování zemin.

Tab. 2: Rozdělení zrn a frakcí zemin [12]

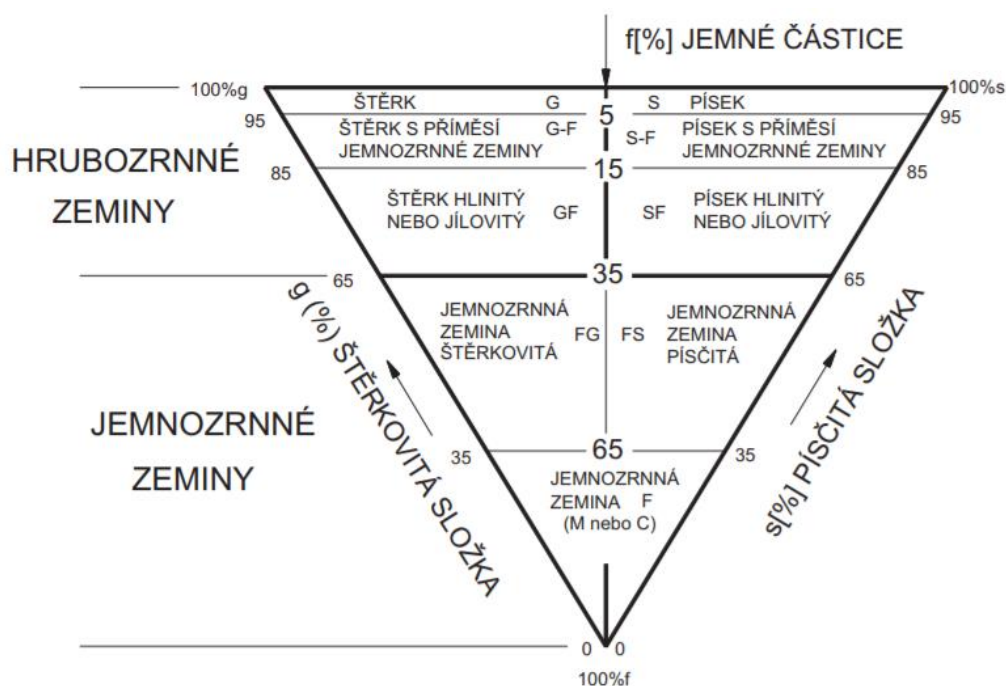
Skupiny zemin	Frakce	Symbol	Velikost zrn [mm]
Velmi hrubozrnná zemina	Velký balvan	lBo	> 630
	Balvan	Bo	> 200 do ≤ 630
	Valoun	Co	> 63 do ≤ 200
Hrubozrnná zemina	Štěrk	Gr	> 2,0 do ≤ 63
	hrubozrnný	cGr	> 20 do ≤ 63
	střednězrnný	mGr	> 6,3 do ≤ 20
	jemnozrnný	fGr	> 2,0 do ≤ 6,3
	Písek	Sa	> 0,063 do ≤ 2,0
	hrubozrnný	cSa	> 0,63 do ≤ 2,0
	střednězrnný	mSa	> 0,2 do ≤ 0,63
	jemnozrnný	fSa	> 0,063 do ≤ 2,0
Jemnozrnná zemina	Prach	Si	> 0,002 do ≤ 0,063
	hrubozrnný	cSi	> 0,02 do ≤ 0,063
	střednězrnný	mSi	> 0,0063 do ≤ 0,02
	jemnozrnný	fSi	> 0,002 do ≤ 0,0063
	Jíl	Cl	≤ 0,002

Legenda: large boulder (lBo), boulder (Bo), cobble (Co), gravel (Gr), coarse gravel (cGr), medium gravel (mGr), fine gravel (fGr), sand (Sa), coarse sand (cSa), medium sand (mSa), fine sand (fSa), silt (Si), coarse silt (cSi), medium silt (mSi), fine silt (fSi), clay (Cl).

Z Tab. 2 lze konstatovat, že základními zeminami jsou zeminy stejnozrnné, jež jsou složeny z částic pouze úzké frakce. Většina běžně se vyskytujících zemin je ovšem smíšených, tzn., že obsahuje hlavní a druhotnou frakci. Hlavní frakce předurčuje inženýrské vlastnosti zeminy a popsat ji lze podstatným jménem neboli hlavním názvem.

Rozdělení zrn a frakcí zemin, které je uvedeno v Tab. 2, slouží pro zařazení spíše hrubozrnnějších zemin. Pro třídění a pojmenování zemin s částicemi do 60 mm slouží podle ČSN EN ISO 14688-1 [12] trojúhelníkový diagram, který je uveden na Obr. 1.

Kromě klasifikačního diagramu (Obr. 1) se u štěrkovitých a písčitých zemin navíc podle normy ČSN EN ISO 14688-1 [12] hodnotí **charakter zrnitosti**, který je dán **průběhem křivky zrnitosti** [12]. Podle průběhu křivky lze určit, zda je zemina dobře zrněná (symbol W – plochý tvar křivky) nebo špatně zrněná (symbol P – strmá křivka zrnitosti). Kritériem pro toto rozdělení je *číslo nestejnozrnitosti* C_u (viz vzorec (1)) a *číslo křivosti* C_c (viz vzorec (2)). Tyto čísla se vypočítají pomocí tzv. hodnot d_{10} , d_{30} a d_{60} , odečtených z křivky zrnitosti a odpovídajících průměrů zrn při propadu 10 %, 30 % a 60 % podle vztahů (1) a (2).



Obr. 1: Klasifikační diagram zemin s částicemi < 60 mm [12]

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} [-] \quad (1)$$

kde C_u ... číslo nestejnozrnosti,
 d_{60} ... velikost zrna [mm], odpovídající propadu 60 % odečteného z čáry zrnitosti,
 d_{10} ... velikost zrna [mm], odpovídající propadu 10 % odečteného z čáry zrnitosti.

Z čísla nestejnozrnosti můžeme určit, zda je zemina:

- *stejnozrnná*: $C_u < 5$,
- *středně stejnozrnná*: $C_u = 5$ až 15 ,
- *nestejnozrnná*: $C_u > 15$.

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{60} \cdot d_{10}} [-] \quad (2)$$

kde C_c ... číslo křivosti,
 d_{30} ... velikost zrna [mm], odpovídající propadu 30 % odečteného z čáry zrnitosti
(d_{60} dtto na 60 % propadu, d_{10} dtto na 10 % propadu).

Z čísla křivosti určujeme, zda je zemina:

- *dobře zrněná*: $C_c = 1$ až 3 a $C_u > 4$,
- *špatně vytríděná (chybí frakce)*: $C_c < 1$ nebo > 3 .

Na základě klasifikačního diagramu (Obr. 1), čísel nestejnozrnatosti a křivosti se rozdělují štěrkovité a písčité zeminy podle norem ČSN EN ISO 14688-1 [12] a ČSN EN 1997-1 [11] na pět typů, které jsou se svými charakteristikami uvedeny v Tab. 3 a Tab. 4.

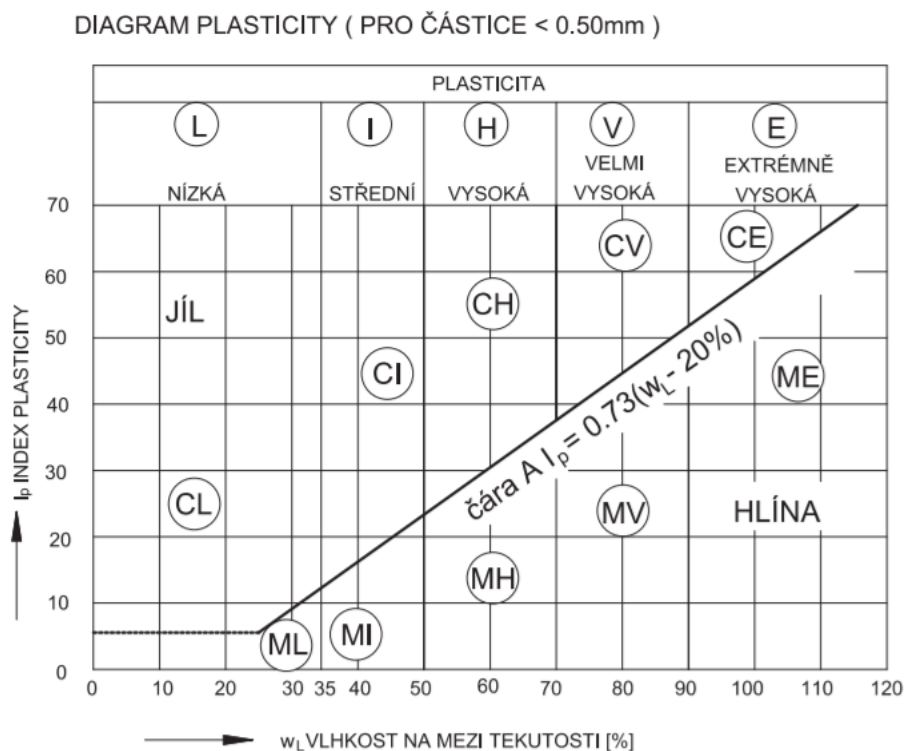
Tab. 3: Klasifikace štěrkovitých zemin [11]

Třída	Název typu zeminy	Symbol	Kvalitativní znaky			Poloha vůči čáře A na diagramu plasticity (Obr. 2)
			Obsah f^* [%]	C_u	C_c	
G1	Štěrka dobře zrněná	GW	< 5	4	1 - 3	-
G2	Štěrka špatně zrněná	GP	< 5	4	< 1	-
			-	-	> 3	-
G3	Štěrka s příměsí jemnozrnné zeminy	G-F	5 - 15	-	-	-
G4	Štěrka hlinitá	GM	15 - 35	-	-	POD
G5	Štěrka jílovitá	GC	15 - 35	-	-	NAD
*f... podíl jemné frakce 0,063 mm						

Tab. 4: Klasifikace písčitých zemin [11]

Třída	Název typu zeminy	Symbol	Kvalitativní znaky			Poloha vůči čáře A na diagramu plasticity (Obr. 2)
			Obsah f [%]	C_u	C_c	
S1	Písek dobře zrněný	SW	< 5	> 4	1 - 3	-
S2	Písek špatně zrněný	SP	< 5	< 4	< 1	-
			-	-	> 3	-
S3	Písek s příměsí jemnozrnné zeminy	S-F	5 - 15	-	-	-
S4	Písek hlinitý	SM	15 - 35	-	-	POD
S5	Písek jílovitý	SC	15 - 35	-	-	NAD

Jak je vidět z Tab. 3 a Tab. 4 klasifikaci zemin lze dále podle normy ČSN EN 1997-1 rozšířit o tzv. **plasticitu** zemin [11]. Pro určení a zobrazení zrnitosti a plasticity jemnozrnných zemin slouží diagram plasticity, respektive čára A, která od sebe odlišuje jíly (C) a hlíny (M), jak je uvedeno v následujícím Obr. 2. Závislost plasticity na *mezi tekutosti* (w_L), podle diagramu plasticity (Obr. 2), vytváří rozlišení plasticity zemin na nízkou (L), střední (I), vysokou (H), velmi vysokou (V) a extrémně vysokou (E), viz také Tab. 5.



Obr. 2: Diagram plasticity pro zeminy s částicemi menšími než 0,5 mm [11]

Tab. 5: Rozlišení plasticity v závislosti na mezi tekutosti (w_L) [11]

Plasticita	Symbol	Mez tekutosti w_L [%]
Nízká	L	< 35
Střední	I	35 - 50
Vysoká	H	50 - 70
Velmi vysoká	V	70 - 90
Extrémně vysoká	E	> 90

V souladu s klasifikačním diagramem (Obr. 1) lze provést, podle příměsí hrubozrnných frakcí a laboratorně stanovanými hodnotami plasticity zemin, jejich rozdělení na osm typů (F1 až F8), jež jsou uvedeny v Tab. 6 [12].

Tab. 6: Klasifikace jemnozrnných zemin [12]

Třída	Název typu zeminy	Symbol	Kvalitativní znaky			
			Obsah f [%]	g : s	Poloha vůči A na diagramu plasticity (Obr. 2)	w _L [%]
F1	Šterkovitá hlína	MG	35 – 65	g > s	POD	-
F2	Jíl šterkovitý	CG	35 - 65	g > s	NAD	-
F3	Hlína písčitá	MS	35 - 65	g > s	POD	-
F4	Jíl písčitý	CS	35 - 65	g > s	NAD	-
F5	Hlína s nízkou plasticitou	ML	> 65	-	POD	< 35
	Hlína se střední plasticitou	MI	> 65	-	POD	35 - 50
F6	Jíl s nízkou plasticitou	CL	> 65	-	NAD	< 35
	Jíl se střední plasticitou	CI	> 65	-	NAD	35 - 50
F7	Hlína s vysokou plasticitou	MH	> 65	-	POD	50 - 70
	Hlína s velmi vysokou plasticitou	MV	> 65	-	POD	70 - 90
	Hlína s extrémně vysokou plasticitou	ME	> 65	-	POD	> 90
F8	Jíl s vysokou plasticitou	CH	> 65	-	NAD	50 - 70
	Jíl s velmi vysokou plasticitou	CV	> 65	-	NAD	70 - 90
	Jíl s extrémně vysokou plasticitou	CE	> 65	-	NAD	> 90

Kromě výše zmíněných normových požadavků se pro zařazení a určení vlastností zemin dále, při jejich identifikaci a použití, vychází z předpisů, které specifikují zeminu jako základovou půdu. V této podobě je zemina využívána v rámci výkopových prací a jako součást zemního tělesa pozemních komunikací. Při využití zeminy k těmto účelům je nutné splnění normových a technických požadavků, které jsou obecně uvedeny v následující kapitole 1.1.2.

1.1.2 Zeminy jako součást základových půd

Úkolem základů stavby je podle Paška a kol. [10] bezpečně přenést zatížení do podloží, způsobené hmotností a provozem stavebního objektu, bez deformací a poruch podloží nebo objektu. Z těchto důvodů je nutné specifikovat vhodnost použití zemin pro dané prostředí.

Charakter a základní složky zemin se musí identifikovat před tím, než se zahájí samotné stavební práce. Materiál se musí vyzkoušet, identifikovat a popsat ve shodě s uznávanou terminologií. Na základě geologického popisu, který se hodnotí vizuálně, se zeminy klasifikují a popisují podle uznávaného geotechnického klasifikačního a popisného systému. Dodatečně k vizuálnímu hodnocení se může pro klasifikaci, identifikaci a kvalifikaci zemin použít i řada dalších zkoušek, jako jsou: zrnitost, objemová hmotnost, vlhkost, Atterbergerovy meze atd. [11].

Klasifikace zemin jako základových půd podle ČSN EN 1997-1 [11] je totožná se základním inženýrskogeologickým členěním, který byl uveden výše. Podobný je i trojúhelníkový klasifikační diagram (Obr. 1).

U staveb pozemních komunikací se ovšem, z hlediska možného využití zemin, ještě dále vychází z normy ČSN 73 6133 [16], která zeminy zařídí podle vhodnosti jejich použití na *nepoužitelné*, *nevhodné*, *podmínečně vhodné* a *vhodné* (viz Tab. 7). Kritéria vhodnosti a použitelnosti jsou obecně vymezena normami a technickými předpisy, mezi které patří ČSN EN 1997-1 [11], ČSN EN 1997-2 [17], TKP 30 [18] a ev. ZTKP [19].

Z výše uvedených norem a technických požadavků vyplývá, že pro provádění zásypů výkopů a rýh inženýrských sítí, lze jako vhodný materiál použít:

- **přírodní neupravenou zeminu** (pokud svými vlastnostmi vyhovuje požadavkům příslušných norem) vytěženou z rýhy nebo výkopu nacházející se v blízkosti staveniště,
- **upravené zeminy** odpovídající požadavkům TP 94 [20]. Ve smyslu TP 94 se za upravené zeminy považují zeminy s přidáním jakéhokoliv pojiva (vápna, cementu, popílku apod.),
- **směs stmelanou cementem** odpovídající svým složením některé z variant uvedené v ČSN 73 6124-1 [21], resp. ČSN EN 14 224-1 [22],
- **zeminy odpovídající** svým složením **nestmeleným materiálům** dle ČSN 73 6126-1 [23] (např. mechanicky zpevněná zemina, šterkodrt'),
- **recyklované stavební demoliční materiály**, např. R-materiály ze starých porušených vrstev z asfaltových směsí, recyklovaný beton, recyklovaný štěrk z vozovek a kolejového lože atd.

Tab. 7: Vhodnost použití zemin pro pozemní komunikace [16]

Poř. číslo	Název zeminy	Třída a symbol	Specifické vlastnosti			Vhodnost do násypu			Vhodnost pro podloží vozovky		
			Obsah jemných částic f (%)	Mez tekutosti w _L (%)	Postavení v diagramu (Casagrande)	Nevhodná	Podmínečně vhodná	Vhodná	Nevhodná	Podmínečně vhodná	Vhodná
1	Štěrkovitá hlína	F1 MG	35 až 65		Pod čarou A		X			X	
2	Štěrkovitý jíl	F2 CG	35 až 65		Nad čarou A		X			X	
3	Písčítá hlína	F3 MS	35 až 65		Pod čarou A		X			X	
4	Písčitý jíl	F4 CS	35 až 65		Nad čarou A		X			X	
5	Hlína s nízkou plasticitou	F5 ML	> 65	< 50	Pod čarou A		X		X		
6	Hlína se střední plasticitou	F5 MI	> 65	< 50	Pod čarou A		X		X		
7	Jíl s nízkou plasticitou	F6 CL	> 65	< 50	Nad čarou A		X		X		
8	Jíl se střední plasticitou	F6 CI	> 65	< 50	Nad čarou A		X		X		
9	Hlína s vysokou plasticitou	F7 MH	> 65	> 50	Pod čarou A	X			X		
10	Hlína s velmi vysokou plasticitou	F7 MV	> 65	> 50	Pod čarou A	X			X		
11	Hlína s extrémně vysokou plasticitou	F7 ME	> 65	> 50	Pod čarou A	Nelze ani upravit			Nelze ani upravit		
12	Jíl s vysokou plasticitou	F8 CH	> 65	> 50	Nad čarou A	X			X		
13	Jíl s velmi vysokou plasticitou	F8 CV	> 65	> 50	Nad čarou A	X			X		
14	Jíl s extrémně vysokou plasticitou	F8 CE	> 65	> 50	Nad čarou A	Nelze ani upravit			Nelze ani upravit		
			f % (s+g+f)	Současné další podmínka:							
15	Písek dobře zrněný	S1 SW	< 5	C _u > 6	C _c = 1 až 3			X			X
16	Písek špatně zrněný	S2 SP	< 5	Non SW	-		X			X	
17	Písek s příměsí jemnozrnné zeminy	S3 S-F	5 až 15	-	-			X		X	
18	Písek hlinitý	S4 SM	15 až 35		Pod čarou A		X			X	
19	Písek jílovitý	S5 SC	15 až 35		Nad čarou A		X			X	
20	Štěrk dobře zrněný	G1 GW	< 5	C _u > 4	C _c = 1 až 3			X			X
21	Štěrk špatně zrněný	G2 GP	< 5	Non GW			X			X	
22	Štěrk s příměsí jemnozrnné zeminy	G3 G-F	5 až 15	-	-			X			X
23	Štěrk hlinitý	G4 GM	15 až 35	-	Pod čarou A		X			X	
24	Štěrk jílovitý	G5 GC	15 až 35	-	Nad čarou A		X			X	

C_u = d₆₀/d₁₀, C_c = (d₃₀)²/d₁₀ · d₆₀, kde: d₁₀ je průměr zrna odpovídající na křivce zrnitosti 10 % propadu, d₃₀ dtto na 30 % propadu, d₆₀ dtto na 60 % propadu.

Z normových požadavků dále vyplývá, že jako vhodný přírodní materiál lze pro zásypy rýh a výkopů použít v souladu s ČSN EN 73 6133 [16] zeminy uvedené v Tab. 8.

Tab. 8: Použitelnost zemin pro stavbu zemního tělesa [16]

	NEPOUŽITELNÉ^{a)} k jakémukoliv použití	NEVHODNÉ k přímému použití bez úpravy	PODMÍNEČNĚ VHODNÉ k přímému použití bez úpravy	VHODNÉ k přímému použití bez úpravy
Podmínky použití	Nelze upravit běžnými technologiemi, použití se zpravidla vylučuje	Musí se vždy upravit ^{c)}	Podle dalších vlastností se rozhodne, zda lze použít přímo bez úpravy nebo zda se musí upravit	Lze použít přímo bez úpravy
Aktivní zóna	Organické zeminy s obsahem organických látek větším než % ^{b)} , bahna, rašelina, humus, ornice, CE, ME	ML, MI, CL, CI, MH, MV, CH, CV	S-F, MG, CG, MS, CS, SP, SM, SC, GP, GM, GC	SW, GW, G-F
Násyp		MH, MV, CH, CV	MG, CG, MS, CS, SP, SM, SC, GP, GM, GC, ML, MI, CL, CI	SW, GW, G-F, S-F
a) Netýká se podloží násypu a svahů zářezů. b) Obsah 6 % je hranice pro středně organické zeminy dle ČSN EN ISO 14688-2. c) Neplatí pro poddajnou vrstvu vrstevnatého zásypu.				

Při vrácení vykopané zeminy zpět do výkopu nebo rýhy musí být jednoznačně prokázáno, že se jedná o zeminu použitelnou dle ČSN 73 6133 [16] a TKP 3 [24]. Mezi hlavní požadavky pro použitelnost zeminy např. patří mez tekutosti $w_L > 50 \%$, číslo (stupeň) konzistence $I_c \leq 0,5$, maximální objemová hmotnost zeminy Proctor standard (laboratorní srovnávací suchá objemová hmotnost) $\rho_{dmax.PS} < 1\,500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, okamžitý index únosnosti IBI roven min. 10 % pro násyp a 5 % pro podloží násypu, kalifornský poměr únosnosti CBR (po sycení ve vodě po dobu 96 h) min. 10 % atd. V případě, že zemina nesplňuje požadavky stanovené normou ČSN 73 6133 [16] a další technické požadavky pro její zpětné použití v konstrukci musí se upravit. Možnosti úpravy zemin budou uvedeny v kapitole 1.2.

1.1.3 Požadavky pro práci se zeminou z výkopových prací

Jak již bylo zmíněno výše zeminy lze podle geologického hlediska obecně charakterizovat a definovat. Na základě platných norem lze provést konkrétní popis či klasifikaci zemin a následně určit možnost jejich dalšího využití či provedení návrhu na ošetření. Jak je to ale s nakládáním se zeminou v běžné praxi?

Zemina vznikající v rámci výkopových prací základů staveb, inženýrských sítí atd. je ve většině případů označována jako odpad a takto je s ní i nakládáno. Důvod, proč bývá zemina takto označována, pramení z nynější platné legislativy, přesněji ze zákona č. 185/2001 Sb., Zákona o odpadech a o změně některých dalších zákonů (dále jen „zákon o odpadech“) [1]. Podle tohoto zákona se zemina často pro subjekt stává v místě stavby neupotřebitelnou a musí být proto odvážena na skládky odpadů. Dalšími důvody jsou ty, že je zemina znečištěná, tvoří na stavbě přebytek, nemůže být na stavbě využita a stavebník se jí proto musí zbavit, případně je zemina jako odpad předurčena v projektové dokumentaci stavby [1]. Z těchto důvodů je naplněna definice zeminy, jakožto „odpadu“.

Nutno je zároveň podotknout, že existují případy, kdy se na vytěženou zeminu zákon o odpadech nevztahuje, nebo kdy lze předcházet tomu, že zeminu za odpad nepovažujeme. Tento zákon se nevztahuje na nakládání s nekontaminovanou zeminou a jiným přírodním materiálem vytěženým během stavební činnosti, pokud je zajištěno, že materiál bude použit ve svém přirozeném stavu pro účely stavby na místě, na kterém byl vytěžen [1]. Podle zákona o odpadech se tedy jedná o neznečištěnou zeminu a jiný přírodní materiál (jalová hornina, rubanina apod.) které neopustí místo stavby, nejsou považovány za odpad a lze je použít bez dalších omezení přímo na stavbě, při dodržení stanovených technologických postupů, tj. k zabudování do stavby v souladu s projektem stavby (např. k zásypům, násypům, k vytváření zemních těles, terénním úpravám apod.). Neznečištěná výkopová zemina a další přírodní materiál mohou vznikat pouze v místech, kde nedošlo v minulosti k haváriím ani k jinému způsobu znečištění vnášením škodlivin, např. nebezpečných chemických látek nebo směsí do horninového prostředí a zpravidla v místech nedotčených v minulosti antropogenní činností. V případě využití takovýchto materiálů přímo v místě, kde byly vytěženy, mluvíme o tzv. předcházení vzniku odpadů. Předcházení vzniku odpadů musí být součástí projektu stavby, tedy v souladu s projektem stavby.

Vytěženou zeminu lze také podle zákona o odpadech považovat za vedlejší produkt. V tomto případě musí ovšem vytěžená zemina splňovat všechny podmínky podle § 3 odst. 5 zákona o odpadech kumulativně, včetně požadavků na výrobky podle jiných právních předpisů.

Tzv. předcházení vzniku odpadů v rámci výkopových prací ovšem ve většině případů nebývá v rámci stavebních projektů uvedeno a další využitelnost zeminy se proto neuvažuje. V těchto případech je tedy zemina označena jako odpad a ukládána na skládky. V případě dalšího využití této zeminy se musí vycházet z technických požadavků pro využívání odpadů na povrchu terénu.

1.1.4 Ohlášení a stavební povolení výkopových prací

V souvislosti s prováděním výkopových prací je nutné nejenom respektovat legislativní nařízení týkající se odpadového hospodářství a využitelností zemin na povrchu terénu, nutné je také, při provádění výkopových prací, postupovat podle nařízení týkající se stavebního povolení a ohlášení. Povinnosti a odpovědnosti osob při přípravě a provádění staveb jsou dána pro stavebníka v § 152 stavebního zákona č. 183/2006 Sb. (dále jen stavební zákon) [25]. Podle stavebního zákona je stavebník povinen dbát na řádnou přípravu a provádění stavby. Přitom musí mít na zřeteli zejména ochranu života, zdraví osob nebo zvířat, ochranu životního prostředí a majetku, i šetrnost k sousedství.

Na základě platných legislativních nařízení je před zahájením výkopových prací důležité zajistit, kdy je potřeba pro dané výkopové práce žádat o stavební povolení a kdy vystačí pouze stavební ohlášení. Podle stavebního zákona nevyžadují rozhodnutí o změně využití území ani územní souhlas terénní úpravy do výšky 1,5 m, nebo hloubky o výměře do 300 m² na pozemcích, které nemají společnou hranici s veřejnou pozemní komunikací nebo veřejným prostranstvím, v případě, že nedochází k nakládání s odpady [25].

Stavební ohlášení stavebnímu úřadu vyžadují pozemní stavby do 300 m² celkové zastavěné plochy a hloubky do 3 m, pokud nejsou vodním dílem nebo stavbou podle § 16 odst. 2 písm. d) stavebního zákona [25]. Podle stavebního zákona rozhoduje ministerstvo průmyslu a obchodu u staveb určených k účelům těžby, zpracování, transportu a ukládání radioaktivních surovin na území vyhrazeném pro tyto účely, u staveb souvisejících s úložišti radioaktivních odpadů, obsahujících výlučně přírodní radionuklidy, u staveb, které jsou jaderným zařízením nebo náležejí k provozním celkům a u staveb či zařízeních pro přenos elektřiny, přepravu plynu, uskladňování plynu nebo výrobu elektřiny o celkovém instalovaném elektrickém výkonu 100 MW a více.

Pro ostatní stavby je podle stavebního zákona nutné stavební povolení. Jedná se např. o komunikace (silnice, chodníky), přípojky na kanalizaci a rozvodné sítě (vodovod, plynovod, elektřina, rozvod tepla) nebo podzemní stavby hlubší než 3 m.

Z těchto nařízení vyplývá, že pokud se budou využívat upravené zeminy, jak bude uvedeno dále ve formě samozhutnitelných zálivek, bude potřeba pro tyto práce stavební povolení. Po získání ohlášení či stavebního povolení následují ve stavební praxi vlastní zemní práce. Jak je uvedeno v následující kapitole 1.1.5, provádění těchto prací musí být v souladu s platnými legislativními požadavky.

1.1.5 Provádění vlastních zemních prací

Provádění vlastních zemních prací se v nynější praxi řídí nařízeními, mezi která patří: technické podmínky TP 146 Povolování a provádění výkopů a zásypů rýh pro inženýrské sítě ve vozovkách pozemních komunikací [26], zákon č. 13/1997 Sb., o pozemních komunikacích [27] a provádějící vyhlášky č. 104/1997 Sb. Vyhláška Ministerstva dopravy a spojů, kterou se provádí zákon o pozemních komunikacích [28], oba v platném znění, technické podmínky TP 170 (včetně jejich dodatku) [29], technické podmínky TP 87 [30] a další technické kvalitativní podmínky staveb (TKP), při respektování dalších souvisejících ČSN a TP.

Technické podmínky TP 146 [26] stanovují kvalitativní parametry, vhodné technologické postupy pro provádění výkopů rýh pro inženýrské sítě a jejich zpětných zásypů v pozemních komunikacích a požadavky na kontrolu provádění prací, jejichž dodržování má zajistit požadovanou kvalitu prací.

Inženýrské sítě jsou podle TP 146 [26] v mnoha případech ukládány do vyhloubených výkopů (otevřených rýh), které buď křížují pozemní komunikace (dále jen PK), nebo jsou s nimi v souběhu. Nutností míst, kde rýhy nebo výkopy leží v oblasti konstrukce vozovky, zpevněné krajnice, nemotoristické komunikace, chodníku nebo jiné dopravní plochy (dále jen vozovky) nebo v jejich těsné blízkosti je, aby bylo po provedení zásypu dosaženo maximální možné homogenity únosnosti vozovky a jejího podloží [26]. Homogenita je totiž zárukou minimalizace výskytu dodatečných deformací. Tento požadavek vyúsťuje v nutnost použití vhodných zásypových materiálů a jejich řádného zhutnění (při použití správné technologie provádění ve smyslu příslušných ustanovení TKP 4) [31].

V situaci, kdy není možné z důvodu nebezpečí porušení pozemního vedení inženýrských sítí provést zhutnění zásypového materiálu na požadovanou míru zhutnění, lze použít některé netradiční technologie, jako je např. překrytí zásypu rýhy geosynteticky, příp. použití asfaltových membrán s přesahem min. 0,5 m (doporučuje se 0,9 m zejména u širších rýh) nebo použít panely pro dlouhodobé zachycení a rovnoměrné roznesení napětí vyvolaného nehomogenitou podloží konstrukce vozovky a projevujícího se jeho dodatečným sedáním [26]. Podmínky řešení, geotechnické poměry, fyzikálně mechanické vlastnosti zemin, geometrické uspořádání rýh a základní technologické postupy jsou specifické pro každou stavbu.

Povolení k umístění výkopů a rýh v silničním pozemku (chodnicích, vozovce, dopravních a dalších plochách) vydává ve smyslu zákona č. 13/1997 Sb., o pozemních komunikacích [27] a provádějící vyhlášky č. 104/1997 Sb. [28], ve znění pozdějších předpisů příslušný silniční

správní úřad po předchozím souhlasu správce PK [26]. Před vlastním zahájením výkopových prací je nezbytné prověřit umístění stávajících inženýrských sítí, které by mohly být dotčeny nově připravovanými výkopovými pracemi a podle jejich umístění zvolit odpovídající technologii výkopových prací. V dalším kroku se následně vyznačí na povrchu vozovky či chodníku průběh rýhy a její šířka s tím, že šířka rýhy se minimalizuje s ohledem na výkopové práce i vlastní ukládání vedení inženýrských sítí. V TP 146 je zároveň stanoveno, že výkopové práce se nemají provádět od 1. listopadu do 31. března. V uvedeném termínu se nedoporučuje provádět ani konečnou obnovu konstrukce vozovky. V případě, že dojde k náhlým haváriím, musí být prováděny výkopové práce vhodným způsobem s ohledem na místní podmínky a se souhlasem správce PK. [26]

Jak již bylo zmíněno výše, způsob provádění rýh závisí na významu a rozměrech rýhy, druhu podloží hornin a na dalších místních podmínkách. Při provádění výkopu rýh, tj. při rozpojování podkladních vrstev konstrukce vozovky, podloží a rozpojování horniny, odebrání výkopu s jeho odhozením nebo naložením na dopravní prostředek, musí být dodržovány zásady ČSN 73 6133 [16], TKP 4 [31] a brán zřetel i na další normy a předpisy. V následujících obrázcích (Obr. 3 a Obr. 4) jsou uvedeny příklad možného provedení výkopu s již položenými inženýrskými sítěmi (dále jen IS).



Obr. 3: Provedení výkopu a zásypu IS



Obr. 4: Hutnění zásypového materiálu

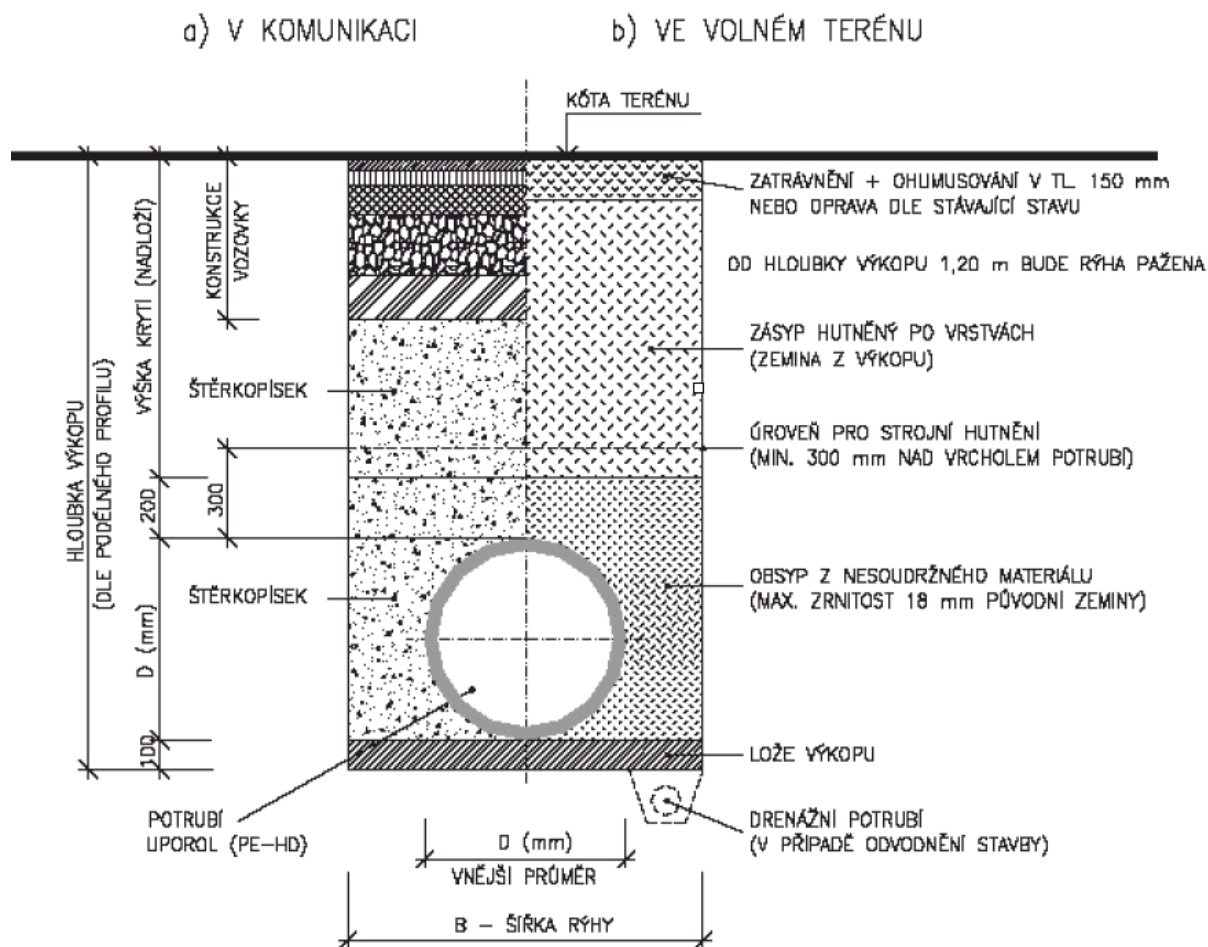
Z Obr. 3 a Obr. 4 je možné vidět příklad uložení IS a výplně výkopu. Konkrétně se jedná o schéma uložení vodovodního potrubí, které se běžně využívá v praxi. U ostatních IS je schéma uložení a následná aplikace zásypu podobná. Jednotlivé schémata se liší pouze

v detailech a dostupnosti materiálů, které lze použít. Při provádění zásypu a zejména pak při jeho hutnění je nutno dbát na opatření a ochranu IS, které jsou v rýze uloženy. Zhotovitel dále zodpovídá za zajištění soustavného odvodnění výkopů, za řádné zabezpečení stability a za případné škody na křižujícím vedení. Prostor rýhy lze podle TP 164 [26] rozdělit na:

- ***zónu obsypu***, která je vymezena dnem výkopu a sahá (v závislosti na druhu vedení) do výšky cca 0,3 m nad temeno vedení, resp. jeho ochrany,
- ***zónu zásypu***, která je vymezena horní hranou zóny obsypu a zemní plání (spodní hranou konstrukce vozovky/chodníku) a ve své horní části zahrnuje aktivní zónu (nejčastěji o mocnosti 0,5 m),
- ***zónu konstrukce vozovky***.

Do zóny obsypu se obecně doporučuje použít štěrkopísek např. frakce 0-22 mm, případně podle místních podmínek použití i jiný vhodný materiál (dle ČSN EN 1610 [32]). Možné je také použití popílku ve smyslu ČSN 73 6133 [16]. Provádění obsypu a jeho hutnění musí odpovídat druhu IS. Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.1.2, jako zásypové materiály výkopů lze použít přírodní neupravenou zeminu, upravené zeminy, směs stmelenu cementem, zeminy odpovídající svým složením nestmeleným materiálům a recyklované stavební demoliční materiály. Použití jednotlivých materiálů musí být ovšem v souladu s podmínkami uvedeným v ČSN 73 6133 [16]. Obecné schéma možného provedení výkopu je uvedeno na následujícím obrázku (Obr. 5).

Materiál zásypu se ukládá po vrstvách, jejichž tloušťka a vlhkost je přizpůsobena použité hutnicí technice, šířce rýhy a zhutnitelnosti zásypového materiálu. Tloušťka vrstvy před zhutněním se obvykle pohybuje v rozmezí 0,2 – 0,3 m. Požadavky na minimální dovolené krytí pozemních sítí vyplývá z normy ČSN 73 6005 (viz Tab. 9) [33]. Pro hutnění musí být použit takový materiál, hutnicí technika a hutnění tak, aby byla splněna kritéria uvedena v TKP 3 [24], TKP 4 [31] a TP 146 [26].



Obr. 5: Obecné schéma uložení potrubí z polypropylenu [32]

Tab. 9: Nejmenší dovolené krytí podzemních sítí [33]

Druh sítí	Nejmenší krytí v [m]		
	Chodník	Vozovka	Volný terén
Silové kabely do 1 kV až do 220 kV	0,35 až 1,30	1,0 až 1,30	0,35/0,70 až 1,30
Sdělovací kabely	0,4 až 0,5	0,9 až 1,2	0,6 až 1,00
Plynovodní potrubí	0,80	1,00	0,80
Vodovodní sítě	1,00 až 1,60	1,50	1,00 až 1,60
Tepelné sítě	0,50	1,00	0,50
Kabelovody	0,60	1,00	0,60
Stokové sítě a kanalizační přípojky	1,00	1,80	1,00
Kolektor	0,50	1,00	0,50

Na základě výše uvedených normových požadavků a technických norem lze konstatovat, že materiály mají daná kritéria, za kterých je možné určitý druh materiálu použít. V případě, že tyto kritéria nesplňují je nutná jejich úprava či předúprava. Následující kapitola 1.1.6 se proto věnuje předúpravě zemin, jež nesplňují některé podmínky či obsahují nežádoucí složky, díky kterým nemůže být zemina zpětně použita v konstrukci.

1.1.6 Předúprava zemin pro možnost jejich použití

V předchozích kapitolách bylo pojednáno o tom, jaké druhy a typy zemin se nachází na našem území, jaké technické a jiné požadavky musí zeminy splňovat, aby bylo možné jejich zpětné použití v konstrukci. Nyní se dostáváme k tématu předúpravy zeminy, která je nezbytná především pak v případě, kdy zemina obsahuje nevhodné granulometrické složení či organické částice. Jak bude popsáno dále předúpravu zemin lze provádět pomocí vhodných technologických kroků, zařízení či nástrojů, kterými lze upravit některé její vlastnosti tak, aby bylo možné její zpětné využití v konstrukci.

Předúprava zemin, vznikajících v rámci výkopových prací, se týká především těch, které se podle ČSN 73 6133 [16] nesmí použít do zemního tělesa, tj. organické zeminy, bahna, rašelina, humus a ornice atd. Tyto zeminy se nesmějí použít především z toho důvodu, že obsahují nevhodné frakce, organické látky v množství větším než 6 % (suché objemové hmotnosti částic pod 2 mm, viz Obr. 6), či se přímo jedná o zeminy extrémně plastické (třídy ME a CE) [16]. Zapříčinění nemožnosti zpětného použití zemin také mnohdy nastává přímo na staveništi (viz Obr. 7), kde je zemina kontaminována jinými stavebními materiály či odpady, je promáčena deštěi atp. Z těchto důvodů je přímo předurčeno, že takováto zemina končí na skládkách odpadů. V této kapitole se proto zaměříme na možnosti, které vedou k předúpravě zemin, jež by umožnily její následné použití.



Obr. 6: Obsah organických látek v zemině v množství větším než 6 %



Obr. 7: Kontaminovaná zemina a její odvoz na skládku

První z kroků předúpravy zemin se týká odstranění nevhodných frakcí, především velkých frakcí kameniva nad 32 mm, které by mohly nepříznivě ovlivňovat soudržnost, zhoršovat zhutnitelnost, znemožňovat dokonalé vyplnění prostoru okolo inženýrských sítí atd. Jak bude uvedeno v následujících kapitolách, mohou tyto frakce také

negativně ovlivnit vlastnosti zemin v případě, že uvažujeme jejich zpětné použití ve stabilizované či ztekucené formě. Nevhodné frakce kameniva by se mohly odstraňovat přímo na staveništi (in situ) pomocí různých strojů, či strojového příslušenství. Vhodným řešením by mohla být např. prosévací rotační lžíce *Flexxifinger® quicker picker* na smykem řízené nakladače (Obr. 8 a Obr. 9) [34, 35].



Obr. 8: Prosévací rotační lžíce [34]

Obr. 9: Nástavce na prosévací rotační lžíce
Flexxifinger® quicker picker [35]

Původně byly rotační prosévací lžíce, mimo jiné i *Flexxifinger® quicker picker*, zkonstruovány pro oblast zemědělství a zahradnictví. S postupem času se ovšem díky flexibilitě tohoto nástavce rozšířily i do oblasti průmyslových odvětví, těžby a úpravnictví surovin, terénních úprav, lesnictví atd. [35] Ve srovnání s klasickým nástavcem (či prosévací lžicí) na kamení či zeminu (viz Obr. 10, Obr. 11), který může sloužit jako modifikace tohoto nástavce, je rotační prosévací lžíce až třikrát účinnější. Klasický nástavec (na kamení či zeminu) materiál nabere a setřesením dojde k propadu frakcí menších než mezery mezi oky nástavce. Nástavec *Flexxifinger® quicker picker* funguje na principu odstředivé síly, kdy pomocí rotace koše dochází k oddělování menších frakcí, než jsou otvory nástavce. [36, 37]



Obr. 10: Varianta prosévací lžice se zuby a vyztuženými bočními břity pro až 35tunová rypadla [36]



Obr. 11: Varianta prosévací lžice pro minirypadla 3–6 tun s hladkým břitem [36]

Další možností pro úpravu granulometrie mohou být mobilní třídiče či drtiče. Třídiče jsou určeny pro třídící práce přímo na stavbě. Třídiče mohou být konstruovány pro ruční plnění lopatou či pro strojní plnění pomocí stavebních strojů (Obr. 12, Obr. 13). Třídiče pracují na principu kmitavého pohybu, který je vykonáván pomocí vibrační desky. Součástí třídiče může být uspořádání i více sít nad sebou, čímž můžeme, získat materiál o více frakcích. [37]



Obr. 12: Dvojsytný vibrační třídič sypkých materiálů MoleScreen Middle [37]



Obr. 13: Vibrační třídič na podvozku - MoleScreen trailer [37]

Půdní frézy či drtiče jsou multifunkční zařízení, které slouží k mělkému zpracování půdy a drcení hrud [38]. Drtičů a možností jejich použití existuje celá řada. Drtiče je možné použít jako nástavce na stavební stroje (traktor, bagr, atd.) nebo jako samostatné jednotky (viz Obr. 14). Možná je i úprava velikosti rotačního (zdrobňovacího) válce.



Obr. 14: Půdní drtič [38]

Dalším procesem předúpravy zemin je odstranění biologického někdy také organického materiálu. Pod organickým materiálem si lze představit různé kořeny rostlin, případně drobné živočichy. Velké částice (především kořeny) lze z vykopané zeminy odstranit spolu s větší frakcí kameniva, jak bylo zmíněno v předchozím textu. Pro odstranění větších částí organického materiálu lze tedy použít rotační či prosévací třídiče. V případě, že by např. některé částice propadly přes prosévací síta je nutné je odstranit ručně. Přípustná hranice organického materiálu v zemině je podle ČSN EN ISO 14688-2 [13] 6 %. Větší množství organických látek v zemině znemožňuje jejich zpětné použití v konstrukcích, proto je nutností se odstraněním tohoto materiálu zabývat.

Kromě větších zrn a organického materiálu může být dalším problémem zemin to, že tvoří tzv. pevné celky. Tyto pevné celky jsou utvářeny díky zavlhlým jílovitým částicím, které znemožňují rozpojitelnost zeminy. Z těchto důvodů opět na řadu přichází mechanizace, pomocí které je možné tyto pevné celky rozpojit. K rozpojování či zdrobňování zeminy mohou sloužit půdní drtiče, jak již bylo zmíněno v předchozím textu. V případě, že se jedná o zdrobňování malých ploch či celků můžou být na staveništi použity prakticky jakékoliv ruční nástroje (kladiva, rýče, hrábě, ruční drtiče a třídiče atd.).

Jak bude uvedeno v následující kapitole 1.2, zeminu mnohdy nejde použít v takovém stavu, v jakém byla vyhloubena a je nutná její úprava. Úprava se může týkat například míchání zeminy s dalšími složkami. S tímto procesem mnohdy souvisí převoz, nakládání a ukládání dalších druhů materiálů a případně nově vzniklých směsí. Pro míchání zeminy s dalšími druhy materiálů mohou být využívány např. běžné stavební míchačky s nuceným oběhem. Tyto míchačky je možné použít přímo na staveništi. Pokud nám místo stavby neumožňuje míchání směsí přímo na staveništi, lze použít autodomíhávače. Tyto stroje jsou schopny převážet směsi i na větší vzdálenosti. Vnitřní prostor bubny (autodomíhávače) je vybaven šroubovicí, která při převozu udržuje směs stále v pohybu.

Pro naložení zeminy a ostatních složek do autodomíhávače lze využít např. bagry či traktory se lžicemi. Vhodné je i použití pásových dopravníků (mobilních či stabilních, viz Obr. 15). Vykládka směsí z autodomíhávačů může být prováděna buď spodním vyprazdňováním, kdy je směs lita přímo na určené místo, či pomocí čerpadel (čerpání směsí do vzdálenějších míst).



Obr. 15: Plnění autodomíhávače [39]

Na základě zjištěných poznatků a výše uvedených normových požadavků můžeme říci, že zeminu mnohdy nelze použít v takové stavu, v jakém byla vyhloubena. Tato kapitola byla věnována předúpravě zeminy tak, aby z ní byly odstraněny nežádoucí složky, případně organický materiál, který znesnadňuje její další použití. Jak se dočteme dále, k tomu, abychom mohli zeminu zpětně použít v konstrukci, je nutné provést řadu dalších úprav. Především pak v tom případě, kdy chceme zeminu využít ve formě samozhutnitelné zálivky, jakožto nové technologie možnosti úpravy zemin, která je předmětem zkoumání disertační práce.

1.2 Úprava zemin

Na základě výše zjištěných poznatků lze z geotechnického hlediska říci, že obecně nelze z výkopových prací získat zeminu, která bude splňovat požadavky na konstrukci bez jakékoliv úpravy. Norma ČSN 73 6133 [16] jasně stanovuje, že nelze zpětně v konstrukci (zemním tělese) použít organické zeminy, bahna, rašeliny, humus a ornice s obsahem organických látek větším než 6 % (objemové hmotnosti částic pod 2 mm). Bez zvláštních opatření se zároveň do zemního tělesa nesmí použít extrémně plastické zeminy třídy ME a CE [31]. Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací TKP 4 [31] zároveň stanovují, že bez úpravy nebo zvláštních opatření není možné do zemního tělesa použít následující zeminy a horniny:

- zasolené zeminy s obsahem vodou rozpustných solí větším než 10 %,
- objemově nestabilní zeminy a horniny (bobtnavé jíly a jílovité břidlice) u nichž, při běžných klimatických podmínkách, bude v zemním tělese docházet k objemovým změnám větším než 3 %,
- jíly a jílovité zeminy s mezí tekutostí větší než 50 % nebo číslem plasticity I_p větším než 35 %,
- zeminy se stupněm konzistence I_c menším než 0,5,
- skalní horniny, u kterých dojde působením klimatických vlivů a zatížení během životnosti pozemní komunikace k takové změně fyzikálně-mechanických vlastností, které mohou vést k deformacím, případně poruše zářezových svahů, násypových těles, zemní pláň nebo dalších částí konstrukce pozemní komunikace. Jsou to např. rozpadavé jílovce, slínovce, břidlice, anhydrity apod..

Z těchto a spoustě dalších důvodů je proto snahou najít optimální technologii či způsob, kterým by bylo dosaženo zlepšení požadovaných parametrů zemin. V dnešní praxi existuje celá řada technologií pro úpravu zemin. Při výběru technologie je vždy nutné si uvědomit, k jakému účelu bude zemina sloužit, proveditelnost technologie v daném místě atd.. Proto se obvykle před zahájením procesu návrhu, s cílem seznámit se s vlastnostmi podloží, provádí průzkum lokality. Při výběru lokality je podle Makusy [40] třeba zohlednit následující kritéria:

- návrh a způsob zatížení konstrukce,
- typ základu, který má být použit,
- únosnost podloží.

Už od minulosti hraje únosnost podloží významnou roli při rozhodování výběru lokality. Jakmile je únosnost podloží nedostatečná, je možné podle Makusy [40] zohlednit následující možnosti:

- změnit konstrukci tak, aby vyhovovala podmínkám stavby,
- odstranit a vyměnit zeminu,
- opustit místo.

Opuštěných míst kvůli špatné únosnosti v posledních letech dramaticky vzrostl. Výsledkem toho je nedostatek pozemků a zvýšená poptávka po přírodních zdrojích. [40] Odstranění a vyměnění zeminy je zároveň častým procesem. Vzhledem k odpadovému hospodářství a úbytku přírodních zdrojů je současnou snahou praxe a disertační práce se úpravami technických vlastností zemin zabývat. Především z toho důvodu, aby tyto zeminy nekončily na skládkách odpadů a mohly být zpětně použity v konstrukci.

Jedním a v nynější praxi nejpoužívanějším způsobem zlepšení vlastností zemin je jejich stabilizace, která se provádí pomocí vhodných druhů a množství pojiv, případně jejich kombinací. Úprava zemin pomocí pojiv není mnohdy jednoduchá, a to především z toho důvodu, že každá zemina má tendenci jinak reagovat s použitým pojivem. Reakce zemin spolu s různými druhy pojiv a jejich množstvím se proto musí ověřit laboratorně. [2, 41] Mezi méně známou možnost úpravy zemin patří jejich ztekucení. Jedná se o nový druh technologie úpravy zemin, který není v nynější praxi zcela znám. V České Republice se jedná o dosud nepoužívanou metodu, v zahraničí je tato technologie popsána a realizována pouze výjimečně. [42] Zmínky o zkušenostech s využíváním ztekucených zemin lze najít např. v Německu, Švýcarsku, Francii, Itálii, Velké Británii, USA a Japonsku. Principy ztekucení zemin jsou založeny na použití materiálů, kterými jsou např. stabilizátory (především pojiva), ztekucovadla a případně jiné alternativní suroviny. Konkrétní typy přísad, vzhledem k omezenému používání této technologie a tzv. „know how“ firem, nejsou v praxi běžně známy. Zároveň pro technologii ztekucení zemin nejsou stanoveny přesné normové požadavky, podle kterých by bylo možné ověřovat jejich vlastnosti. Z těchto důvodů bylo snahou se tomuto tématu v disertační práci věnovat. Přesněji pak využitelností a úpravou zemin ve formě samozhutnitelných zálivek.

Následující kapitoly jsou v této souvislosti věnovány jednotlivým technologickým, vzájemně propojeným krokům, které vedou k vývoji nové technologie samozhutnitelných zálivek na bázi zemin. Jak bude rozebráno dále, první technologický krok se týká stabilizace

zemin, pomocí níž lze upravit vlastnosti zeminy tak, aby bylo možné ji následně použít v dalším technologickém kroku, kterým je ztekucení.

1.2.1 Stabilizace zemin

Jak bude uvedeno v kapitole 1.3, první krok nové technologie samozhutnitelných zálivek vychází z úpravy vlastností zemin pomocí použití pojiv či alternativních surovin, které vedou k procesu její stabilizace (především pak jílovitých zemin). Stabilizace podle Kauna [43] a Littla [44] obecně slouží pro úpravu vlastností zemin, mezi které patří např. zpracovatelnost, zhutnitelnost a pevnost. Dalším efektem stabilizace může být podle autorů [43, 44] také zvýšení poměru únosnosti (CBR_{sat}), zvýšení modulu přetvárnosti ($E_{def,2}$), snížení indexu plasticity (I_p) a snížení namrzavosti (β). Protože nejsou tyto vlastnosti vzájemně nezávislé, vede to k tomu, že zlepšení jedné z nich často vede i ke zlepšení zbývajících [45].

Jako stabilizace zemin je podle Bella [45] definován takový chemický, fyzikální nebo mechanický proces, který upravuje vlastnosti zeminy tak, aby bylo dosaženo určitých technických požadavků. Obecně lze konstatovat, že stabilizace může být dosažena několika způsoby. Nejjednodušším stabilizačním procesem je zhutnění a odvodnění zeminy. Dalším postupem může být např. zlepšení granulometrie částic nebo přidání pojiva k zeminám s nízkou pevností [46]. Běžně podle Makusy [40] spadají tyto způsoby úpravy vlastností zeminy do dvou širokých kategorií, kterými je **mechanická stabilizace** (dosažena změnou fyzikálních vlastností půdních částic, např. vibrací, hutnění, přibíjení atd.) a **chemická stabilizace** (dosažena chemickou reakcí mezi stabilizátorem/pojivem a minerálními látkami v zemině). Předmětem disertační práce je především chemická stabilizace, proto se následující kapitoly budou věnovat hlavně tomuto způsobu úpravy vlastností zemin.

Volba pojiva a jeho množství je podle Kauna [43] a Littla [44] závislá na aktuálních vlastnostech zeminy. Ve většině případů se vychází z vlastností, kterými je zrnitost, index plasticity, vlhkost a objemová hmotnost. Jako další důležité parametry lze zároveň považovat ekonomickou výhodnost a dostupnost daného pojiva. Knau [43] např. doporučuje, při provádění stabilizace sledovat především pH zeminy, její vlhkost a zhutnění. Vliv vody totiž může v zemině způsobit lepení půdních částic dohromady, což znesnadňuje její další zpracování atd. Sledovaných parametrů tak může být hned několik. Jak ovšem optimalizovat parametry, které mají být u zemin sledovány a jak provést vhodný výběr a množství daného druhu pojiva k zemině? Právě kvůli velké variabilitě zemin se podle Bella [45] ukazuje, že měřené vlastnosti na zeminách mají koeficient variability 20 – 25 %

a více. Jediné stabilizátory, které je možno brát v úvahu jsou právě proto ty, jež se dají široce aplikovat pro různé druhy zeminy a jsou především cenově dostupné.

Podle Bella [45] se pro stabilizaci zemin používají především následující pojiva:

- vápno nehašené – hydroxid vápenatý ($\text{Ca}(\text{OH})_2$),
- vápno (CaO), vápenná kaše ($\text{Ca}(\text{OH})_2$),
- cement,
- ostatní pojiva – živičné pojivo, enzymy.

Jak sami autoři uvádí a jak již bylo zmíněno výše, rozhodnutí o použitém pojivu záleží na výsledcích laboratorních testů. Každý typ pojiva je nutné s upravovanou zeminou vyzkoušet. [44, 45, 46]

I přes to, že spousta autorů nabádá k provedení laboratorních zkoušek před samotným použitím pojiva s daným typem zeminy, existují i obecné normové a technické požadavky, kterými je možné se při výběru a množství pojiva řídit. Mezi takové např. patří norma ČSN 73 6133 [16] a TP 94 [20]. Z těchto předpisů vyplývá, že pro určení druhu zlepšování kvality zeminy je důležité brát v úvahu především vlhkost zeminy, index plasticity (I_p) a obsah jílovitých částic v zemině (f). Na základě těchto parametrů a podle Bella [45] je pak vhodné použít:

- **3 – 9 % vápna** k zemině, pokud $I_p > 10$ a obsah jílovitých částic $f > 10$ %,
- **3 – 10 % cementu** k zemině, pokud $I_p \leq 10$ a $f < 20$ %,
- **kombinace vápno, cement** (3 – 10 %), pokud $10 < I_p < 20$ a $f < 10$ %.

Kromě sledování vlastností zeminy a následného výběru a množství pojiva je při provádění stabilizace podle Kauna [43], stejně jako u jiných stavebních procesů, nutné také zohledňovat klimatické podmínky. Jako optimální se pro provádění stabilizace jeví teplota v rozmezí + 5 °C až 25 °C. Nepříznivé pro provádění stabilizace jsou teploty pod + 5 °C, či nad + 30 °C. Při těchto teplotách je nutné provést zvláštní opatření, kterými může být např. přidání urychlovači nebo zpomalovačů tuhnutí. Úplný zákaz provádění stabilizace zemin je během silného či dlouhotrvajícího deště.

Jak bude uvedeno v následujících kapitolách jednotlivé druhy pojiv a jejich množství mohou více či méně upravovat požadované technické parametry zemin tak, aby bylo možné jejich zpětné použití v konstrukci. Některé druhy pojiv či jiných stabilizátorů, jak se dočteme dále, mohou příznivě ovlivňovat jak krátkodobé, tak dlouhodobé vlastnosti zemin.

1.2.2 Vliv vápna na stabilizaci zemin

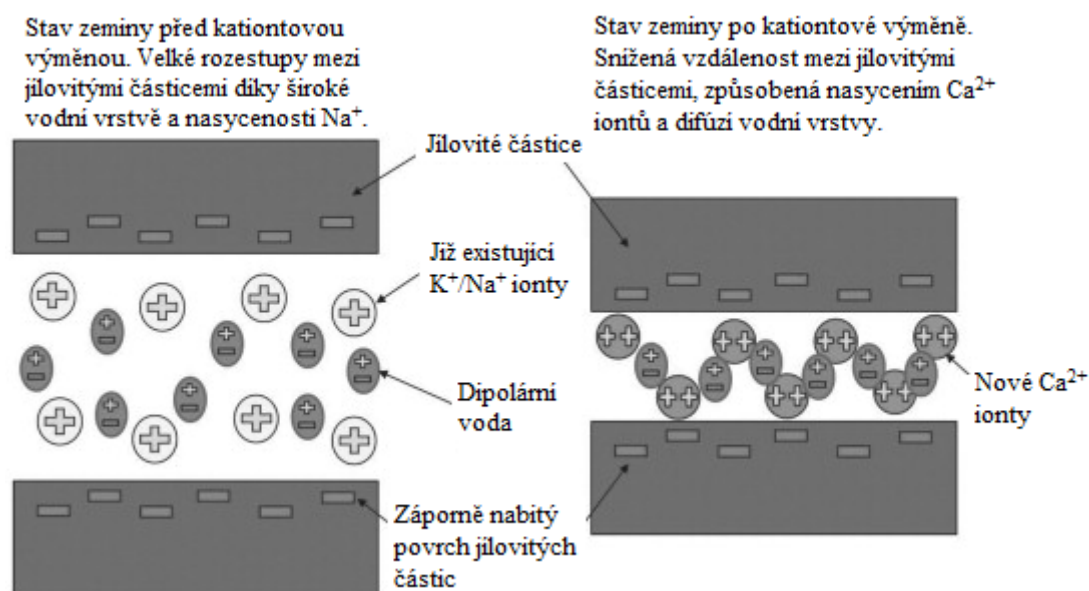
Stabilizace zemin vápnem patří především v České republice mezi jednu z nejčastěji používaných metod. Podle TP 94 [20] se tato metoda využívá především z toho důvodu, že je relativně levná, rychlá a účinná. Jako vápno podle Bella [45] pro stabilizaci uvažujeme hašené nebo nehašené, případně vápenný hydrát (Ca(OH)_2) nikdy ne však vápenec, který je pro stabilizaci zemin inertní. Při interakci zeminy s vápnem dochází k tomu, že jsou všechny jílové minerály atakovány vápnem podle obsahu oxidu křemíku. Např. illit je mnohem méně reaktivní než montmorillonit. Díky tomu, že vápno reaguje s jílovými minerály v zemině ochotněji než cement, je považováno za primární složku při stabilizaci zemin. [45]

Stabilizace zemin vápnem je obecně proces, při kterém v první fázi dochází k výměně volných iontů vápníku (Ca^{2+}) na povrchu jílu, které v dalších fázích nahrazují v krystalové struktuře jílu ionty sodíku (Na^+) a draslíku (K^+) [20]. Při tomto procesu dochází k přeměně vrstevnaté struktury zeminy, která je typická pro jílové minerály na strukturu zrnitou. Tato reakce je taktéž popisována tak, že díky přítomnosti vody (vlhkosti v zemině), vápníku (CaO) a hlinitanů/křemičitanů v zemině, dochází ke vzniku hydratačních produktů (C-S-H a C-A-H gelu), které krystalizují ve formě propletené mřížky stejně jako je tomu u cementu [47]. Vzhledem k povaze reakce je dobré vědět, že není potřeba pro stabilizaci zemin používat vysoce jakostní vápno. [45]

Podrobněji lze podle Pacheco-Torgala [47] interakce vyskytující se mezi pojivem a zeminou popsat pomocí pěti hlavních reakcí, kterými je kationtová výměna, flokulace (někdy také aglomerace), hydratace, pucolánová reakce a potenciální karbonatace. Kationtová výměna a flokulace se objevují okamžitě po smíchání vápna se zeminou a mohou trvat až několik hodin. Hydratace probíhá většinou do jednoho měsíce po smíchání zeminy s vápnem, zatímco pucolánová reakce se vyskytuje v delším časovém měřítku, tj. v měsících nebo letech. [47]

Kationtová výměna vzniká bezprostředně po smíchání zeminy s vápnem. Proces je doprovázen uvolňováním vápenatých iontů do zeminy, které mohou postupně nahrazovat ionty kovů (např. Na^+ , Al^{3+} atd.), jež jsou zabudovány v krystalové mřížce zeminy [46]. Tento proces vede k mnoha fyzikálním změnám zeminy. Jednou z prvních změn, která nastává, je snížení dvojité elektrické vrstvy (adsorbované vody) obklopující jílovité částice. Fyzikální uspořádání jílovitých částic určuje velikost dvojité elektrické vrstvy. Paralelní uspořádání částic např. umožňuje vytvářet větší obalovou vrstvu. Snížení tloušťky dvojité elektrické vrstvy vede k tomu, že částice jsou méně náchylné k dalšímu přidávání vody

k zemině. Druhá změna se projevuje tzv. vločkováním, kdy Van der Waalsovy síly překonávají odpuzování záporně nabitých jílovitých částic, což vede k tomu, že se k sobě částice navzájem těsně přibližují a snižuje se tak tloušťka vrstvy adsorbované vody (Obr. 16). [45, 46, 47]



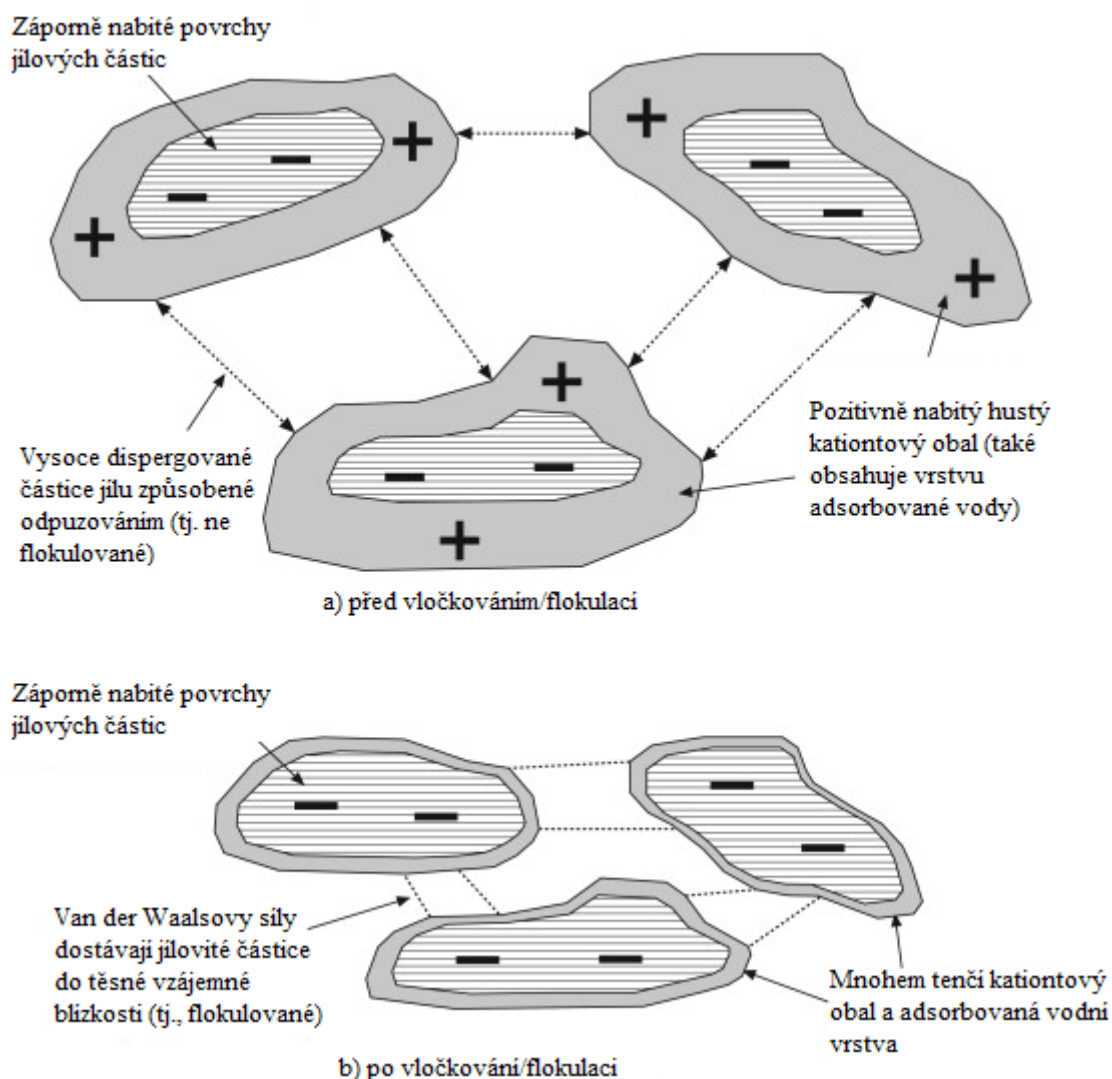
Obr. 16: Schéma znázorňující výměnu kationtů v zemině, k níž dochází okamžitě po smíchání pojivá (vápna, cementu) se zeminou [47]

Výše zmíněné reakce mezi zeminou a pojivem vedou k mnoha změnám textury a pevnosti zeminy. Například k přechodu ze středně-vysoce plastického stavu zeminy na více zrnitou (drobivější), což je charakterizováno i nižším indexem plasticity. Tato změna má za následek zvýšení úhlu tření mezi částicemi zeminy a v důsledku toho zvýšení její smykové pevnosti. [46]

Mezi nejčastější kationty, u kterých dochází ke kationtové výměně podle Pacheco-Torgala [47] patří hliník (Al^{3+}), vápník (Ca^{2+}), hořčík (Mg^{2+}), draslík (K^+), kationt amonný (NH_4^+), sodík (Na^+) a vodík (H^+). Adsorpční potenciál kationtů je ovlivněn valencí a atomovou hmotností. Čím jsou tyto hodnoty vyšší, tím je vyšší adsorpční úroveň kationtů. [47]

Flokulace podle Pacheco-Torgala [47] nastává bezprostředně po smíchání zeminy s pojivem (vápnem, cementem) a spočívá v restrukturalizaci záporně nabitých jílovitých částic, které jsou obklopeny kladně nabitým kationtovým obalem. Tloušťka kationtového obalu závisí na úrovni nabití (čím vyšší je náboj, tím silnější je obal). Zpočátku jsou částice jílu rozptýleny a vyskytuje se u nich paralelní uspořádání. Kvůli jejich negativnímu povrchovému náboji a kladně nabitým kationtovým obalům dochází k tomu, že se částice navzájem odpuzují. Tato odpudivost může být překonána Van der Waalsovými silami, což vede ke flokulaci,

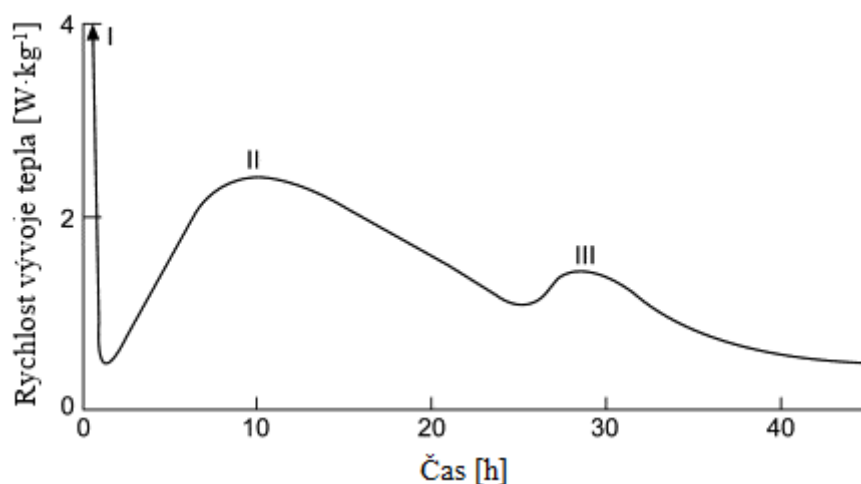
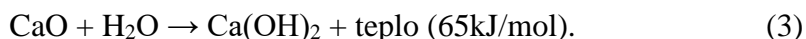
neboli tzv. vločkování částic (Obr. 17). Flokulaci můžeme rozdělit na „dobrou“ a „slabou“. Dobrymi flokulátory jsou ionty, které mají větší hydratační poloměr a vyšší valenci ($\geq 2^+$; Ca^{2+} , Mg^{2+}). Slabými flokulátory jsou ionty, které mají menší hydratační poloměr a nižší valenci (Na^+ , K^+). Výsledkem flokulace je zlepšení technických vlastností zeminy, kterými jsou mez plasticity, zvýšení pevnosti ve smyku a vývoj zrnité struktury. [45, 47]



Obr. 17: Ukázka stavu zeminy a) před flokulací a b) po flokulaci [47]

Hydrataci popisuje Pacheco-Torgala [47] jako proces, který nastává při smíchání pojiva (cementu, vápna) s vodou. Tento proces se dá popsat pomocí rovnice (3). Hydratace nehaseného vápna je exotermní reakce (Obr. 18) při které dochází k uvolňování tepla, které urychluje nárůst pevnosti a snížení vlhkosti zeminy [48]. Tento proces vysoušení zeminy je klíčem pro zlepšení měkkých zemín s vysokým obsahem vlhkosti. Aby došlo k úplnému vyhašení vápna, musí být podle Bergada a kol. [48] množství vlhkosti

v zemině dostatečně vysoké. V případě, že zemina obsahuje malé množství vlhkosti, může dojít ke spálení vápna. Dostatečné množství vody v zemině je zároveň důležité pro iontovou výměnu mezi vápenatými ionty hydratovaného vápna a alkalickými ionty jílových minerálů [48].

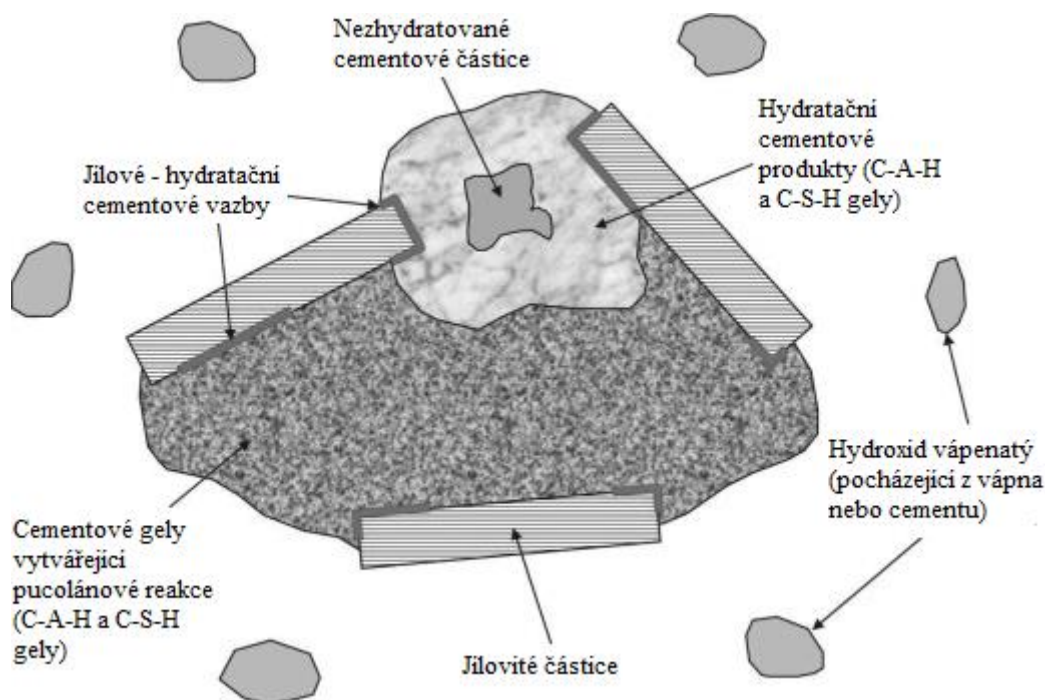
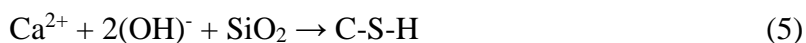


Obr. 18: Vývoj tepla při hydrataci obyčejného portlandského cementu při 20 °C a poměru vody ku cementu $w/c=0,4$. I, II, III – dosažení třech maxim při hydratační reakci. [47]

Reakce oxidu vápenatého s vodou, podle rovnice (3), vede ke vzniku hydroxidu vápenatého a tepla. Reakce dále pokračuje podle rovnice (4), čímž dochází ke zvýšení elektrolytické koncentrace a pH zeminy. Touto reakcí dochází k rozpouštění SiO_2 a Al_2O_3 z jílovitých částí zeminy. Tyto sloučeniny reagují s vápníkem za vzniku hydrátů křemičitanů a hlinitanů vápenatých, což jsou produkty podobné těm, jež vznikají v cementové pastě [41]. Obecně tak při hydrataci dochází k iontové výměně, flokulaci a pucolánové reakci. [47, 48]



Pucolánová reakce se vyskytuje po smíchání pojiva se zeminou až po delší době (měsíce až roky). Hlavní mechanismus pucolánové reakce zahrnuje transport hydroxidu vápenatého pomocí vody a spojení s hlinitanovými a/nebo silikátovými jílovými minerály. Výsledkem je vznik „cementových produktů“ obsahujících hydráty křemičitanů a hlinitanů vápenatých. Jakékoliv rozpuštěné vápenaté ionty Ca^{2+} uvnitř zeminy pak reagují s jakýmkoliv rozpuštěným SiO_2 a Al_2O_3 z jílovitých minerálů za vzniku hydratovaných C-S-H a C-A-H gelů (Obr. 19). [41, 48] Chemicky lze proces podle Pacheco-Torgala [47] vyjádřit pomocí následujících rovnic (5), (6):



Obr. 19: Vytváření cementových produktů formovaných během hydratace a dlouhodobých pucolánových reakcí [47]

Pacheco-Torgala ve své knize [47] uvádí, že při pucolánové reakci dochází ke spotřebování vody v zemině, což je výhodné z hlediska zlepšení technických vlastností zeminy. Zemina se stává pevnější a je méně náchylná k objemovým změnám. Zároveň autor uvádí, že pucolánové reakce nejsou ukončeny ani po pěti letech zrání. Potenciální rozpustnost křemičitanů a hlinitanů v zemině a jejich pravděpodobná reakce s vápnem/cementem, za vzniku cementových vazeb, silně závisí na pH zeminy. [47] Podle Davidsona a kol. [49] se pucolánové reakce vyskytují pouze v případě, že je pH zeminy $\geq 10,5$. Což je situace, kdy se SiO_2 a Al_2O_3 stávají rozpustnými.

Podrobnějšímu studiu vlivu vápna na jílovité minerály v zemině se ve své publikaci věnoval Bell [45]. V rámci studie Bell zjistil, že i při přidání malého množství vápna k montmorillonitické zemině (jílu) dochází k rychlému počátečnímu zvýšení pevnosti zeminy v tlaku. Totéž platí pro kaolinit a velmi jemné částice křemene. Na základě výzkumu bylo zjištěno, že optimální množství přidaného vápna k montmorillonitické zemině bylo 4 %. Pro kaolinitické jíly se pohybovalo optimální množství vápna mezi 4 % a 6 %, zatímco u křemičité zeminy bylo optimální množství 4 % až 8 %. Z výsledků studie zároveň vyplynulo,

že pevnost zeminy se s přidavkem množství vápna nezvyšovala lineárně. Bylo dokonce prokázáno, že nadměrný přídavek vápna k zemině vede ke snížení její pevnosti. Za jednu z hlavních proměnných, která ovlivňuje pevnost stabilizované zeminy vápnem z hlediska funkce času, teploty a relativní vlhkosti považuje Bell proces zrání. Na základě výzkumu dospěl k závěru, že během prvních sedmi dnů se pevnost zeminy zvyšuje poměrně rychle, zatímco v následujícím období (dnech, týdnech, měsících a rocích) je nárůst pevnosti pozvolnější.

Při aplikaci vápna k určitému typu zeminy může podle Bella [45] zároveň docházet k řadě chyb, kterým je třeba se vyvarovat. Mezi tyto chyby patří:

- neprovedení průkazných zkoušek zeminy s vápnem – investor se spokojí s tím, že v blízké lokalitě nebo s „podobnou zeminou“ bylo zlepšení již dříve úspěšné,
- špatné dávkování vápna, tj. nesprávně nastavený dávkovač,
- podcenění významu vlhkosti zeminy,
- dávkování špatného vápna (tj. vápna se špatnými parametry, ve snaze ušetřit peníze) či nekvalitního vápna (zhydratovaného – delší doba skladování, nesprávné skladování,...),
- použití neúčinných mechanismů k promísení se zeminou,
- nedostatečná kontrola u dodavatele či investora.

Stabilizace vápnem se většinou používá v geotechnických a environmentálních aplikacích, zahrnujících např. zapouzdření kontaminantů, provedení zásypů (např. mokré soudržné zeminy), zlepšení podloží dálnic, stabilizaci svahů, zlepšení základů atd.. Při provádění stabilizace zemin vápnem je důležité sledovat přítomnost síranů a organických materiálů, které mohou omezovat proces stabilizace. Přítomnost síranů (např. sádry) může mít za následek bobtnání zeminy, což výrazně ovlivňuje její pevnost. Obecně se dá konstatovat, že stabilizace zemin vápnem vede ke zlepšení technických vlastností zeminy, kterými je zvýšení pevnosti v prostém tlaku, zvýšení indexu CBR, stabilizace směsi po saturaci, zvýšení odolnosti proti mrazu, erozi atd. [50]

Kromě vápna se pro stabilizaci zemin používá cement. Jak bude rozebráno dále, vápno na rozdíl od cementu chemicky atakuje jílovou část zeminy. Cement reaguje spíše s vodou, případně křemičitými složkami obsaženým v zemině, za vzniku hydratačních produktů. Nutné je ovšem dodat, že při použití vápna nelze dosáhnout takových pevností v tlaku, jak při použití cementu a také to, že vápno není moc vhodné pro použití s písky kvůli

jejich inertnímu křemennému povrchu. Použití vápna a cementu je proto vždy nutné zvážit individuálně s použitým druhem zeminy. [45]

1.2.3 Vliv cementu na stabilizaci zemin

Stejně jako tomu bylo u vápna, tak i cement patří mezi materiály, které se v běžné praxi používají pro úpravu zemin, především pak stabilizaci, již dlouhou dobu. Cement se podle Bella [45] ovšem používá spíše pro úpravu technických vlastností písků či písčitých zemin na rozdíl od vápna, které se spíše využívá a má větší účinek při úpravě jílovitých zemin. Tento princip má jistě své opodstatnění, ale nelze ho brát jako pravidlo. Faktem totiž je, že je tento princip založen na jednoduchém a obecně známém pravidle, vztahujícím se k tomu, že zemina smíchaná s cementem je tzv. „písková malta“, jejíž pevnost je ovlivněna použitým cementem. [45]

Důležité je ovšem vnímat i další aspekty použití cementu jakožto stabilizátoru zemin. Zejména to, že je cement vhodný stabilizátor pro téměř všechny typy zemin, ať už jde o zeminy písčité či jílovité. V případě použití cementu k jílovité zemině je ovšem nutné počítat s tím, že se mohou vyskytnout problémy způsobené nedokonalým mícháním. [45, 47, 50]

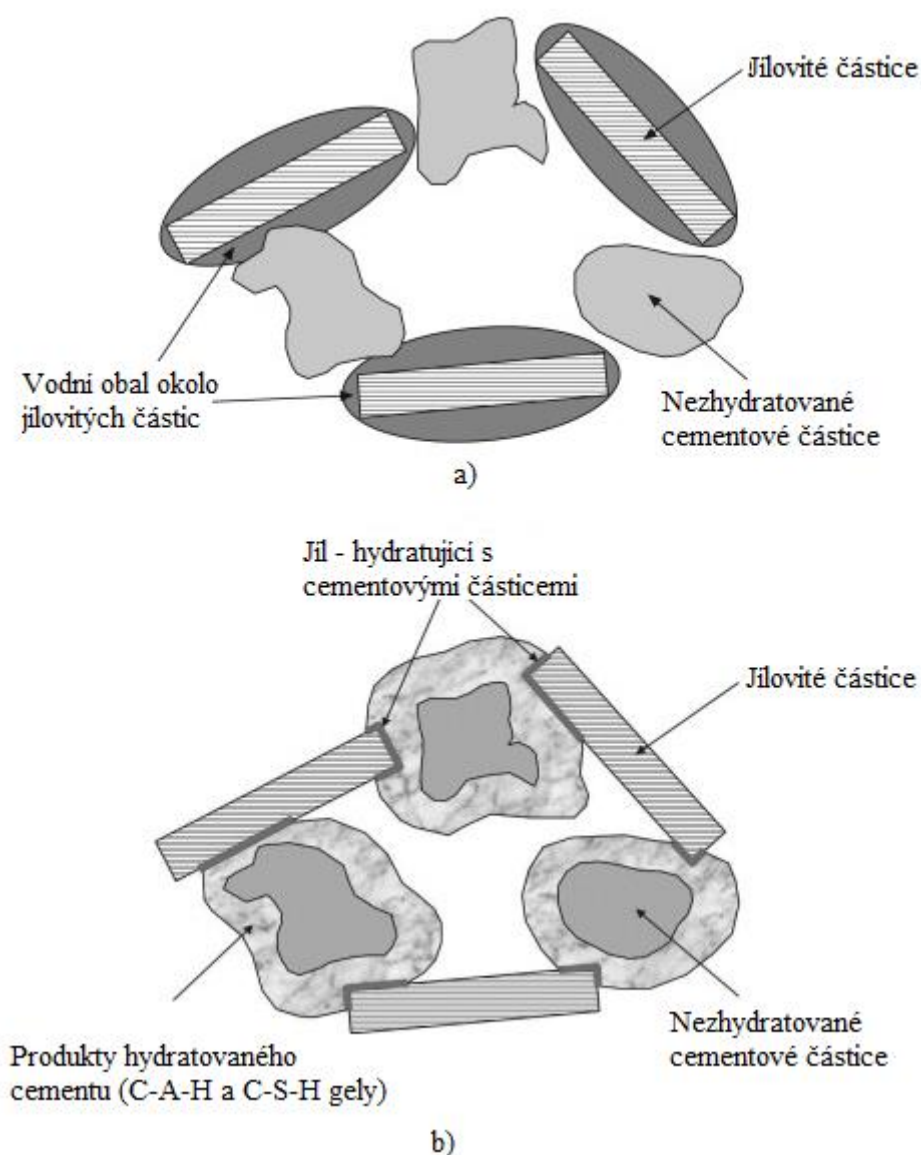
Zemina smíchaná s cementem vede po přidání vody k hydratačním dějům, které lze podle Pacheco-Torgala [47] popsat pěti fázemi. V první fázi dochází k rozpouštění cementových částic, což vede k následnému zvýšení iontové koncentrace ve vodním prostředí. Jakmile je iontová koncentrace dostatečně vysoká, vznikají v roztoku nasycené sloučeniny, které krystalizují a vytvářejí propletenou mřížku probíhající skrz zeminu. V mřížce zůstává zemina sama o sobě jako inertní plnivo. Tyto produkty se vytvářejí blízko nebo na povrchu nezhydratovaných částic cementu. [45, 47] Nutné je zároveň zmínit, že většina cementů obsahuje malé množství volného vápna, které je schopné chemicky reagovat s jílovitými částicemi obsaženými v zemině. Takováto reakce přispívá k celkovému zpevňujícímu efektu stabilizace zemin pomocí cementu. [45]

Pro stabilizaci zemin se v běžné praxi nejčastěji používá portlandský cement CEM I a portlandský cement směsný CEM II [45, 47, 50]. Z hlediska použitého cementu, je podle Pacheco-Torgala [47] proces hydratace (zvyšování pevnosti) zeminy smíchané s cementem a vodou, ovlivněn čtyřmi hlavními sloučeninami. Dvě jsou na bázi křemičitanů (C_3S , C_2S) a dvě jsou na bázi hlinitanů (C_3A , C_4AF). První hlavní hydratovanou cementovou složkou je trikalciumpilíkát (alit, C_3S). Trikalciumpilíkát (C_3S) hydratuje a vytvrzuje se velmi rychle (během 3 hodin až 14 dní po smíchání zeminy s cementem). Zároveň přispívá

k počátečnímu nárůstu pevností. Další hydratovanou cementovou složkou je dikalcium silikát (belit, C_2S), jehož hydratace a vytvrzování jsou poměrně pomalé. Spíše, než k počátečnímu vývoji pevností přispívá C_2S k pozdějšímu nárůstu pevnosti (obvykle mezi 7 až 14 dny). Trikalcium aluminát (C_3A) je nejúčinnější složkou cementu, která vede k počátečnímu nárůstu pevnosti (během prvních dvou dnů vytvrzování). Při hydrataci C_3A dochází k uvolňování značného množství tepla. Tetraalkaliumaluminát ferrit (brownmillerit, C_4AF) hydratuje velmi rychle, ale dále nevede ke zvyšování pevnosti. [47]

Všechny čtyři výše zmíněné slinkové minerály jsou důležité pro zvyšování pevnosti zeminy. Proces hydratace a vznik primárních hydratačních produktů nastává bezprostředně po smíchání zeminy s cementem a vodou. Částice cementu během hydratace (procesu vytvrzování) vytvářejí mezi sousedními cementovými zrny a částicemi zeminy vazby, které se postupem času vytvrzují za vzniku pevnější struktury (Obr. 20). Hydratační procesy, pěti výše popsaných fází, se mohou výrazně lišit. Tento fakt je ovlivněn právě složením cementu. Důležitá je proto správná volba a množství cementu pro daný druh zeminy. [45, 47, 50]

Aby bylo dosaženo co nejlepších výsledků stabilizace zemin, musí být podle Bella [45] množství cementu voleno pečlivě. Nejnižší hranice množství cementu pro použití jakožto stabilizátoru zemin jsou 2 %. Obecně se doporučuje pro stabilizaci zemin použít množství cementu v rozmezí 2 % až 8 % (z hmot. zeminy). V tzv. „hladové“ zemině (např. jílu nebo v prachovitých zeminách), pro dosažení požadovaných pevností, je nutné použít větší množství cementu (nad 4 %). Opačným efektem je ovšem zvětšení smrštění a ceny. Jako optimální se pro zabránění vzniku smrštění a smršťovacích trhlin jeví použití cementu v maximálním množství do 8 % (z hmotnosti zeminy). Větší množství cementu (nad 8 % z hmot. zeminy) se používá tam, kde je potřeba provést zatížení ještě před úplným dozráním. U hladových zemin se také doporučuje ošetření malým množstvím (cca 2 %) vápna ještě před ošetřením cementem. Někdy se také používá vápno smíchané s cementem. Tento způsob ošetření se využívá u prachovité zeminy. V případě jílovitých zemin je ovšem vhodnější způsob ošetření nejprve vápnem a poté cementem. [45, 50]



Obr. 20: Typický příklad stavu zeminy smíchané s cementem a) před hydratací a b) po několika týdnech zrání, kdy cement reagoval se zeminou za vzniku C-S-H a C-A-H gelů [47]

Při stabilizaci zemin, ať už vápnem, cementem či jejich kombinací by se nemělo zapomínat na proces míchání. Podle Bella [45] se jedná o jednu z nejdůležitějších technologických kroků, kde jsou sledovány některé důležité parametry. Pro hrubé nepřilnavé zeminy zde např. existuje riziko, že při přidání vody dojde k vymytí cementu a jeho stečení dolů skrz propustnou zeminu. To může vést k odchylkám v pevnosti. Prevencí může být buď přidání vody před aplikací cementu, anebo úprava zrnitosti zeminy. U provlhlých či promáčených zemin se pro lepší zpracování (míchání) doporučuje ošetření zeminy vápnem předem (nejlépe 24 hod). Tím se může také snížit množství přidaného cementu. [45]

Kromě míchání je při ošetření zeminy cementem nutné také sledovat množství organických složek a sulfátů v zemině. Pokud zemina obsahuje více jak 1 % organické hmoty, může to zásadně ovlivnit krystalizaci hydratačních produktů cementu. Přítomnost sulfátů v zemině může mít za následek vznik vysoce expanzivního minerálu ettringitu, což je v případě stabilizace nežádoucí. Některé zeminy mohou obsahovat sádrovec, který opět může vést ke vzniku ettringitu. V tomto případě je potřeba zajistit, aby se tyto zeminy po ošetření cementem nedostaly do styku s vodou. [45]

Vyjma vápna a cementu se někdy také pro stabilizaci zemin používají vedlejší energetické produkty. Jak bude uvedeno dále, tyto produkty mohou taktéž ovlivnit některé vlastnosti zeminy. Následující kapitola 1.2.4 je proto věnována tomuto tématu.

1.2.4 Další druhy stabilizace zemin

Jak již bylo zmíněno výše, pro stabilizaci zemin se nejčastěji používá vápno a cement. Podle Makusy [40] jsou tyto stabilizační materiály označovány jako tzv. primární pojiva. V běžné praxi lze ovšem pro stabilizaci zemin použít i jiné druhy stabilizačních materiálů. Jedná se o tzv. sekundární pojiva, mezi které podle TP 93 [51] patří *popílek a popel* (PP, nestabilizovaný), *struska/škvára z granulačních/roštových kotlů, fluidní popel a popílek* (FPP), *popílkový stabilizát* (stabilizovaný popílek, PSt). Tyto materiály lze použít, pro stabilizaci zemin, za splnění určitých technických podmínek uvedených v TP 93 [51]. Mimo jiné se např. jedná o splnění ekologického kritéria, tj. kvalitu výluhu a hmotnostní reaktivitu Ra_{226} , splnění kritérií pro příslušný stavební prvek (účel použití v konstrukci), splnění obecných požadavků na použitelnost atd. [51]

Z výše uvedených materiálů se podle Makusy [40] nejčastěji pro stabilizaci zemin používá především popílek (klasický, fluidní) jakožto nerostný zbytek vznikající při spalování pevných paliv v roštových/granulačních kotlích (v elektrárnách) pro výrobu elektrické energie. Popílký lze rozdělit na dva hlavní typy, kterými je „klasický“ popílek a „fluidní“ popílek. Klasický popílek vzniká při spalování hnědého uhlí v teplotách cca 1400 až 1600 °C a vyznačuje se hlavně obsahem β -křemene a mullitu ($2SiO_2 \cdot 3Al_2O_3$). Granulometrie tohoto popílku je velmi jemnozrnná (0,1 až 100 μm) s významným obsahem skelných částic (kolem 50 %). Tyto částice se vyznačují nepravidelným kulovitým tvarem s hladkým povrchem a ve velké míře ovlivňují vlastnosti popílků, především se jedná o reaktivitu s CaO nebo cementem. [52] Je známo, že popílek není schopen sám o sobě reagovat s vodou, proto se při stabilizaci zemin tímto popílkem vyžaduje použití aktivátoru, jako je vápno nebo

cement. [53] Fluidní popílek vzniká při spalování mletého paliva (antracitu, černého uhlí) s přísadou vápence případně dolomitu. Proces probíhá v cirkulační vrstvě při teplotě okolo 850 °C. Výsledný produkt je tvořen směsí popela z původního paliva, nezreagovaného odsiřovacího činidla (CaO s případnými zbytky CaCO_3), síranu vápenatého, produktů reakce popelovin s CaO a nespáleného paliva. Ve srovnání s klasickým popílkem se CaO ve fluidním popílkem nachází v nezreagované formě, tzn. jako měkce pálené vápno. [52] Přítomnost tzv. reaktivního CaO se s výhodou využívá při stabilizaci zemin. [53]

Makusa ve své literatuře uvádí [40], že obecně při procesu stabilizace zemin popílkem (klasickým, fluidním) dochází spíše k mechanickému spojování, než k iontové výměně mezi popílkem a jílovými minerály. Nicméně v přítomnosti malého množství aktivátoru, může popílek chemicky reagovat za vzniku reakcí podobných jako při hydrataci cementu. Procesem stabilizace zemin popílkem může být dosaženo zlepšení technických vlastností zemin, především pak pevnosti v tlaku měkkých zemin, snížení vzniku potencionálních objemových změn a zlepšení zpracovatelnosti. [40, 53] S výhodou se popílek, při stabilizaci zemin, používá také především z důvodu jeho snadné dostupnosti a nízké ceně (ve srovnání s cenou vápna a cementu) [40]. Jediná omezení a problémy, které mohou při stabilizaci zemin popílkem nastat, jsou podle Whita a kol. [54] následující:

- zemina, která má být stabilizována, musí mít menší obsah vlhkosti, díky čemuž může být vyžadováno její odvodnění,
- směs zeminy stabilizované popílkem, vytvrzované pod bodem mrazu a následným stykem s vodou, je vysoce náchylná k popraskání a ztrátě pevnosti,
- přítomnost síry ve směsi zeminy a popílku, může vést ke vzniku expanzivních reakcí, které vedou ke snížení dlouhodobé pevnosti a trvanlivosti.

Stejně jako tomu bylo u pojiv (vápna a cementu) je úspěšná stabilizace zemin popílkem závislá na správné volbě a množství popílku, které je potřeba ověřit laboratorně. [55]

Jak se dočteme dále, úprava zemin může být dosažena nejen formou stabilizace (pomocí vápna, cementu, popílků atd.), ale také tzv. „technologii ztekucení“, která může vést ke vzniku samozhutnitelných zálivek. Tato technologie není v nynější praxi zcela známa a používána, proto bylo snahou disertační práce se vývojem právě této nové technologie zabývat.

1.3 Samozhutnitelné zálivky

V posledních letech došlo k mnoha inovacím v oblasti materiálů, ze kterých se vyrábí vodovodní, kanalizační potrubí či další vedení inženýrských sítí. Avšak v oblasti metod a technologií provádění zásypů inženýrských sítí, především s cílem zaměřit se na možnost zpětného využití zemin, prozatím k velkým změnám nedošlo.

Běžnou praxí, jak si můžeme všimnout, je provádění zásypů inženýrských sítí pomocí technologie zhutňování zeminy. Méně známá a v ČR zcela nepoužívaná je ovšem technologie tzv. „ztekucení zemin“. Výraz „ztekucení zemin“, „samozhutnitelná zálivka“ někdy také „CLSM“ (Controlled Low Strength Material) se v dnešní době začíná spojovat se vznikem nové technologie možnosti využití zemin.

Pojem samozhutnitelná zálivka je výraz pro vysoce tekutou směs (někdy také „cementovou kaši“), která je složena ze zeminy (jemného kameniva), vody, pojiv (vápna, cementu), příměsí (popílků) a chemických přísad (stabilizátorů, ztekucujících/plastifikačních přísad, urychlovačů tuhnutí a tvrdnutí atd.). Ve zvláštních případech to mohou být ještě další materiály používané pro cílenou modifikaci některé z vlastností. Samozhutnitelná zálivka je výsledkem vývoje postupů sloužících k úpravě zemin. Jak sám název napovídá, jedná se o materiál, který má tendenci přirozeně téci a vyplnit požadovaný prostor. Způsob úpravy zeminy formou ztekucení může umožnit zpětné využití téměř jakéhokoliv druhu zeminy z výkopových prací. Podmínkou je ovšem splnění požadovaných technických vlastností ztekucených zeminy. Při správném návrhu je pak možné získat samozhutnitelnou zálivku, která je schopna spolehlivě a v relativně krátkém čase vyplnit daný prostor i v těch nejméně přístupných místech inženýrských sítí bez použití vibrace či hutnění. [56, 57]

Samozhutnitelná zálivka je definována ACI Komisí (American Concrete Institute) [58] jako samozhutnitelný cementový materiál, který je v době jeho uložení v tekutém stavu a jenž má stanovenou pevnost v tlaku po 28 dnech zrání 8,3 MPa. Samozhutnitelné zálivky obsahují malé množství cementu (do 8 % z hmot. zeminy/kameniva), což má za následek snížení vývoje pevností. Nízké pevnosti výsledné směsi jsou prováděny záměrně pro možnost budoucího vyhloubení zálivky v případě poškození inženýrských sítí. Samozhutnitelná směs by měla být schopna vyplnit veškerý prostor kolem inženýrských sítí, a to i v těch nejméně přístupných místech, bez nutnosti hutnění a vibrace ve vrstvách. Proces vytvrzení zálivky by měl nastat během několika hodin. [58] Jak je uvedeno dále v kapitole 1.3.1,

proces vytvrzování a především hodnoty pevnosti v tlaku, po určité době zrání, nám mohou sloužit pro rozdělení samozhutnitelných zálivek na dva základní typy.

1.3.1 Typy samozhutnitelných zálivek

Vlastnosti samozhutnitelných zálivek, pro různé technické účely, lze optimalizovat na základě použitých materiálů. Rozhodující vlastností při návrhu samozhutnitelných zálivek je předpoklad, že bude tato zálivka v budoucnu znovu vyhloubena. Na základě tohoto požadavku rozdělujeme samozhutnitelné zálivky na *vyhloubitelné* a *nevyhloubitelné*. [58]

Vyhloubitelnost samozhutnitelných zálivek je podle ACI Commite [58] závislá na mnoha faktorech zahrnujících např. pevnost v tlaku, objemovou hmotnost, množství použitého kameniva (zeminy) a použitým zařízením pro vyhloubení. Na základě normových požadavků se doporučuje, aby vyhloubitelné zálivky měly pevnost v tlaku po třech dnech zrání větší jak 0,14 MPa a po 28 dnech zrání větší jak 0,21 MPa. Maximální pevnost v tlaku, které můžou samozhutnitelné zálivky po 28 dnech zrání dosáhnout je doporučena na 1,03 MPa. Dodržování těchto hodnot se provádí pomocí zkoušek pevnosti v tlaku na válcích či krychlicích. [59] Jak je uvedeno dále samozhutnitelné zálivky je možné charakterizovat na základě dalších parametrů, které předurčují možnost jejich aplikace a použití.

1.3.2 Charakteristika samozhutnitelných zálivek

Při popisu či určení charakteristických vlastností samozhutnitelných zálivek se dostáváme do tzv. křižovatky mezi zeminou a betonem. Samozhutnitelné zálivky se vyrábí, jak bude uvedeno dále, převážně z materiálů podobných betonu a jsou stejně tak i umístěovány či aplikovány. Po jejich umístění v konstrukci ale mají vykazovat vlastnosti ztuhnutých zemin. Jakou cestou se tedy vydat při určení a ověřování vlastností samozhutnitelných zálivek?

Požadované charakteristické vlastnosti pro samozhutnitelné zálivky (tzv. CLSM) jsou uvedeny v normě ACI 229R-94 [58]. Podle této normy jsou samozhutnitelné zálivky tzv. „členem rodiny“ cementových malt a mohou být označovány několika výrazy („CLSM“, „CDF – controled density fill“, „flowable fill“, „soil-cement slurry“, „unshrinkable fill“, „K-Krete“ atd.). Výbor ACI 229 [58] dále pro samozhutnitelné zálivky stanovil, že je nelze považovat za beton. Tuto definici spojuje právě s vývojem pevnosti v tlaku, která se ve srovnání samozhutnitelné zálivky s betonem liší. Pokud se očekává, nebo specifikuje, že má být ztekucená zálivka v budoucnu vyhloubena, záměrně obsahuje menší množství cementu, a tudíž i pevnosti v tlaku po 28 dnech zrání musí být mnohem nižší

než požadovaný horní limit stanovený na hodnotu 8,3 MPa. Většina současných aplikací samozhutnitelných zálivek vyžaduje horní hranici pevnosti v tlaku po 28 dnech zrání na 2,1 MPa. Tato mezní hodnota se vztahuje především na nevyhloubitelné zálivky. Obecně lze konstatovat, že pevnost v tlaku ztekucené zálivky by v pozdějším období (měsíce, roky) měla být v rozmezí 0,2 až 1,0 MPa. Při dosažení těchto hodnot pevností v tlaku se očekává, že bude možné samozhutnitelné zálivky v budoucnu znovu vyhloubit. [57] Norma ACI 229R-94 [58] dále uvádí, že všechny vlastnosti samozhutnitelné zálivky je třeba vyhodnotit podle požadovaných parametrů pro její aplikaci v konstrukci.

Podle Naika a kol. [60] není ovšem potřeba vyhodnotit všechny charakteristické vlastnosti, které jsou uvedeny v normě, ale důležité je zaměřit se především na hlavní parametry, které mohou výrazně ovlivnit výsledné vlastnosti zálivky a její aplikaci. Mezi tyto hlavní parametry podle Naika a kol. [60] patří:

- pevnost v tlaku,
- počátek a doba tuhnutí,
- tekutost, konzistence směsi,
- smrštění,
- California bearing-ratio test (CBR test).

Pevnost v tlaku, jak bylo již uvedeno výše, patří mezi hlavní parametry, které je při návrhu samozhutnitelných zálivek nutno sledovat. Stanovení pevnosti v tlaku se provádí na základě normových zkoušek, a kromě porovnání výsledných hodnot se standardy nám může tato zkouška sloužit jako indikátor spolehlivosti složení směsi a poměrů vstupních surovin [61].

Počátek a konec tuhnutí samozhutnitelných zálivek mohou být považovány za důležitou charakteristickou vlastnost obzvláště v případě, kdy má zatuhlá zálivka přenést zatížení, kterým může být např. zásyp, chodník či jiná pochozí či pojízdná konstrukce. Zkouška se provádí pomocí penetračního válečku, kterým se zajišťuje síla nutná pro protlačení povrchové vrstvy zálivky. Tato zkouška může sloužit pro odhad únosnosti. [60, 61] Počátek a konec tuhnutí souvisí podle Chesnera a kol. [62] především s typem a množstvím použitého pojiva (především cementu), plniva (většinou popílků), obsahem vody a povětrnostními podmínkami při aplikaci zálivky.

Tekutost směsi patří mezi jednu z nejdůležitějších charakteristických vlastností samozhutnitelných zálivek, která udává, jak moc je směs schopna téci (vyplnit prostor IS). Při aplikaci je tekutost primárně funkcí obsahu vody, i když např. popílek či plastifikační a jiné

přísady mohou také tuto vlastnost ovlivnit. Čím vyšší je obsah vody ve směsi, tím vyšší je její tekutost a možnost čerpatelnosti (do určité míry). Pro měření tekutosti lze použít několik různých metod. Nejčastěji se ovšem pro ověření těchto vlastností používá zkouška sednutí-rozlitím podle ČSN EN 12350-5. [61]

Smrštění samozhutnitelných zálivek je ovlivněno především vysokým obsahem vody a cementu. Čím vyšší je množství vody a cementu v samozhutnitelné zálivce, tím vyšší smrštění lze očekávat. Tento fakt je dán odpařováním vody ze směsi a hydratačními procesy, což často vede ke smršťování, které se zároveň může projevit vznikem trhlin a prasklin (nejčastěji po stranách a na horním povrchu zálivky). [62]

CBR test patří mezi parametry, kterým se ověřuje únosnost podloží. Primárně je tato zkouška ovšem určena především pro kontrolu únosnosti (neupravených) zemin. Z této zkoušky ovšem vychází tzv. IBI (Immediate bearing index) zkouška, která se dá aplikovat na samozhutnitelné zálivky. Zkouška IBI slouží pro zjištění okamžité hodnoty únosnosti podloží, bez použití zatěžovacího prstence, jako tomu je u CBR testu. Zkouška IBI se zjišťuje většinou do 90 minut po smíchání směsi. V případě směsi, kde je použito pouze vápno (k zemině) se zkouška provádí do 60 minut od smíchání. [62]

Existují i další charakteristické vlastnosti, které nám mohou samozhutnitelné zálivky blíže specifikovat. Sledování konkrétních vlastností je vždy v souladu s aplikací zálivky v konstrukci. Faktem ovšem je, že na základě vhodně zvolených materiálů lze upravovat hlavní požadované parametry a podle autorů [63, 64, 65] získat optimální samozhutnitelnou zálivku jakožto materiál s velmi vysokou zpracovatelností, který má schopnost „samozhutnění“, což znamená, že může být umístěny s minimálním úsilím a bez nutnosti vibrace nebo hutnění. Tento fakt se považuje za největší výhodu samozhutnitelných zálivek. Proces aplikace samozhutnitelných zálivek bez nutnosti vibrace může mít podle Al-Harthyho a kol. [64] zároveň pozitivní efekt na snížení nákladů na výstavbu, její údržbu a zrychlení způsobu provádění.

Kromě výše zmíněných charakteristik je při aplikaci samozhutnitelných zálivek nutné zároveň myslet na to, že dokud není zálivka zatuhlá, musí se s ní podle Hegartyho a kol. [66] zacházet jako s kapalinou. Tato skutečnost je spojována se vztlakovou silou, která může mít za následek vyplavení trub (inženýrských sítí) na povrch. Jako příklad z praxe ve své literatuře Hegarty a kol. [66] uvádí aplikaci samozhutnitelné zálivky o objemové hmotnosti $2275 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a vztlakové síle $3111 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$ působící na betonovou rouru o váze $2194 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$. Takováto situace

způsobí nevyrovnání tlaků a možné vyplavení trouby. Řešením problému se vztlakovou silou je aplikace samozhutnitelné zálivky postupně ve více místech (než jenom na jedno místo), v postupných vrstvách a zajištění potrubí proti vznosu. [66]

Všechny výše zmíněné charakteristické vlastnosti samozhutnitelných zálivek jsou, jak jsme si mohli všimnout, dány právě použitím materiálů, které mohou více či méně tyto vlastnosti a aplikovatelnost zálivek ovlivňovat. Volba použitého materiálu vždy souvisí s konkrétním použitím samozhutnitelné zálivky v daném typu konstrukce. Následující kapitola 1.3.3 je v této souvislosti věnována specifikaci materiálů pro návrh a použití samozhutnitelných zálivek.

1.3.3 Specifikace materiálů pro samozhutnitelné zálivky

Jak již bylo zmíněno výše, pro výrobu samozhutnitelných zálivek se nejčastěji používají zeminy (případně jemné kamenivo), plniva (popílky), pojiva (vápno, cement) a voda. Dalšími, méně známými, a především používanými materiály, kterými lze upravit výsledné vlastnosti samozhutnitelných zálivek jsou přísady (plastifikační, provzdušňující, urychlovače tuhnutí a tvrdnutí atd.). Vhodnou volbou a množstvím jednotlivých složek lze získat samozhutnitelnou zálivku, kterou je možné využít pro vyplnění prostoru inženýrských sítí, jakožto alternativu zhutněné zeminy. Výhodou samozhutnitelné zálivky, ve srovnání se zhutněnou zeminou je především to, že je schopna vyplnit všechny mezery, dutiny, a to i v těch nejméně přístupných místech bez nutnosti vibrace či hutnění.

Vzhledem k tomu, že technologie ztekucení zemin není v České republice zcela známa, bylo nutné při zjišťování specifikace materiálů pro návrh samozhutnitelných zálivek vycházet z podkladů ze zahraničí. Jak bylo zjištěno, většina specifikací pro výběr materiálů, které mohou být použity při návrhu samozhutnitelných zálivek vychází z normy FDOT (Florida Department of Transportation) [67].

Podle specifikace normy FDOT [67] musí být pro konstrukce vozovek a pochozích prostor (chodníky) splněny požadavky na materiál, který má sloužit pro návrh samozhutnitelných zálivek. Specifikace použitých materiálů je uvedena v následující Tab. 10.

Tab. 10: Požadavky na specifikace materiálů podle FDOT [67]

Materiál	Sekce FDOT
Jemné kamenivo ^a	Sekce 902
Portlandský cement (Typ I, II)	Sekce 921
Popílek, struska nebo další pucolánové materiály	Sekce 929
Přísady ^b	Sekce 924
Voda	Sekce 923

^a Jemnozrnné kamenivo se 100 % propadem sítem 9,5 mm a maximálně možným propadem 15 % sítem 75 μm .

^b Vysoce provzdušňující nebo propěňující přísady lze použít místo běžných přísad. Přísady mohou být přidávány až na staveništi podle doporučení výrobce.

Pro návrh samozhutnitelných zálivek norma dále doporučuje použití určitého množství a druhu materiálu, které jsou uvedeny v Tab. 11. I přes tato doporučení je ovšem u specifikace materiálu uvedeno, že hodnoty (uvedené v Tab. 11) mají být brány pouze jako doporučení. Konkrétní výběr druhu a množství materiálu pro návrh samozhutnitelné zálivky se musí vždy stanovit laboratorně. [67]

Tab. 11: Návrh ztekucené zálivky podle FDOT [67]

Materiál	Vyhlobitelné zálivky	Nevyhlobitelné zálivky
Cement (CEM I)	45 - 60 $\text{kg}\cdot\text{m}^3$	45 - 90 $\text{kg}\cdot\text{m}^3$
Popílek	Žádný	90 - 335 $\text{kg}\cdot\text{m}^3$
Voda	^a	^a
Obsah vzduchu ^b	5 - 35 %	5 - 15%
28denní pevnosti v tlaku ^b	Maximum 0,69 MPa	Minimum 0,86 MPa
Objemová hmotnost ^b (s vodou)	1440 - 1760 $\text{kg}\cdot\text{m}^3$	1600 - 2000 $\text{kg}\cdot\text{m}^3$

^aNavržená směs musí mít konzistenci, která bude mít schopnost „samozhutnění“ v době její aplikace.

^bPožadavky na obsah vzduchu ve směsi, pevnost v tlaku a objemovou hmotnost jsou určeny pouze pro laboratorní hodnocení, ale ne pro praxi. Jemné kamenivo může být udáváno v poměru na m^3 .

Jemné kamenivo (někdy také filler) se podle normy FDOT [67] při návrhu samozhutnitelných zálivek přidává k zeminám jako plnivo, zajišťující zvýšení pevnosti v tlaku a schopnost přenášet zatížení. Jemným kamenivem se v tomto případě rozumí částice o velikosti 0,075 mm až 4,75 mm. Vlastnosti, kterými je granulometrie a objemová hmotnost jemného kameniva jsou nejdůležitějšími parametry pro jejich použití při návrhu samozhutnitelných zálivek. Vzniklý kompozitní materiál musí mít vhodnou křivku zrnitosti, aby byla zvýšena tekutost směsi a aby byla před začátkem vytvrzování využita veškerá voda potřebná pro hydrataci a nedocházelo tak k tzv. krvácení směsi. [67]

Nejběžněji používaným jemným kamenivem je písek. V závislosti na objemové hmotnosti může být pro návrh samozhutnitelných zálivek použito jemné kamenivo v množství

$680 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ až $1400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Objemová hmotnost jemného kameniva do značné míry ovlivňuje i hmotnost samozhutnitelné zálivky. Z tohoto důvodu, a aby byla zajištěna tekutost a nedocházelo k segregaci zálivky, se doporučuje použití jemného kameniva o nižších objemových hmotnostech. Použití jemného kameniva závisí především na dostupnosti a ceně tohoto materiálu. [67]

Cementové materiály. Podle normy FDTO [67] je pro výrobu samozhutnitelných zálivek možné použít různé druhy „cementových materiálů“. Při použití těchto materiálů je ovšem nutné volit takové, aby byl splněn požadavek na rozlití a pevnost v tlaku zálivky. Cementové materiály lze podle normy FDTO [67] obecně rozdělit na tři kategorie, kterými jsou: portlandské cementy, pucolánové materiály a jiné cementové příměsi (např. odpadní beton a další, u kterých je vyvolána sekundární reakce hydratací cementu a příměsi).

Portlandské cementy jsou hydraulické pojiva, která tuhnou a tvrdnou reakcí s vodou, čímž vzniká tuhá směs. Množství portlandského cementu a vody v samozhutnitelné zálivce určuje její konečnou pevnost. Při nižším obsahu cementu (v rozmezí od 3 % do 5 % z hmot. agregátu) se 28denní pevnost v tlaku pohybuje od 0,5 MPa do 1,0 MPa. Z cementových materiálů patří portlandské cementy k nejpoužívanějším. [67]

Pucolánové materiály obsahují amorfní křemičitany či hlinitany v jemné (práškové) formě (podobné velikosti částic cementu), které v přítomnosti vody reagují s aktivátorem (typicky s hydroxidem vápenatým) za vzniku hydratačních produktů podobných jako při reakci s cementem. [67] Popis různých druhů pucolánových materiálů a jejich specifikace jsou uvedeny v normě ASTM C618 [68]. Další druhy cementových materiálů fungují na principu reakce s vodou za vzniku hydratačních produktů, bez nutnosti přídavku aktivačního činidla.

Popílky. Mezi další často používané materiály, při návrhu samozhutnitelných zálivek patří (klasické, fluidní). Popílky se používají především díky jejich jemnosti a zlepšení tekutosti zálivky. Vzhledem k pucolánovým vlastnostem popílků, a tudíž schopnosti reakce s oxidem vápenatým za vzniku hydratačních produktů, se v některých případech využívají popílky jako částečná náhrada portlandského cementu.

Fluidní popílek, pokud je používán v malém množství (15 % a méně, z celkové hmot. směsi), může zvýšit vývoj pevnosti v tlaku a tekutost samozhutnitelné zálivky. Popílek obsažený v samozhutnitelné zálivce ve větším množství (až do 94 % z celkové hmot.

směsi) působí jako plnivo. Vyšší množství popílku se ovšem při návrhu samozhutnitelných zálivek nedoporučuje z důvodu splnění environmentálních parametrů (výluhy, ekotoxicitu). Klasický popílek může být při návrhu samozhutnitelných zálivek použit v relativně malém množství (15 % a méně, z celkové hmot. směsi) a to především z toho důvodu, aby se prodloužila doba vývoje pevnosti v tlaku nebo zkrátit čas vytvrzování. Částečně může sloužit popílkem jako náhrada portlandského cementu. [62, 67, 68]

V obou případech popílků (klasický, fluidní) hraje důležitou roli jejich jemnost a pucolánová aktivita. Jemnost popílků ovlivňuje reakci s portlandským cementem, či jiným aktivátorem (vápnem) a zároveň tekutost zálivky. Pucolánová aktivita fluidního popílku je dána množstvím obsahu oxidu křemičitého a hlinitého, který chemicky reaguje s dostupným oxidem vápenatým za vzniku cementových sloučenin, zatímco pucolánová aktivita klasického popílku je ovlivněna obsahem křemičitanu vápenatého, hořečnatého a hlinitanu. Pucolánové reakce popílků mají významný vliv na dosažení požadovaných hodnot pevnosti v tlaku. [62]

Voda. Množství vody přidané do samozhutnitelné zálivky má přímý vliv na tekutost a vývoj pevnosti v tlaku. K tomu, aby bylo dosaženo požadovaného ztekucení, je nutné přidat do směsi dostatečné množství vody, které na druhou stranu může zhoršit parametry pevnosti v tlaku. Požadavek na obsah přidané vody závisí na druhu a množství pevných částic, které jsou ve samozhutnitelné zálivce obsaženy. Množství přidané vody se ve většině materiálových kombinací směsí pohybuje od $250 \text{ l}\cdot\text{m}^{-3}$ do $400 \text{ l}\cdot\text{m}^{-3}$. [64]

Plastifikační/ztekucující přísady. Důležitou vlastností samozhutnitelných zálivek je schopnost tečení. Tato vlastnost, jak již bylo uvedeno výše, může být ovlivněna množstvím přidané vody a částečně přítomností popílků. Méně známé je v nynější praxi, pro zlepšení tekutosti samozhutnitelných zálivek (na bázi zemin), použití plastifikačních či ztekucujících přísad. Z tohoto důvodu bylo snahou a jedním z cílů disertační práce zaměřit se právě na použití těchto přísad.

Princip plastifikačních a ztekucujících přísad je obecně založen na redukci potřebného množství vody a zlepšení zpracovatelnosti směsi. Vhodná volba a množství použité plastifikační či ztekucující přísady se volí podle konkrétního druhu použití. V nynější praxi je známé využívání těchto přísad v oboru zpracování betonu a keramiky.

Pro výrobu betonových směsí se z chemického hlediska používají plastifikační a superplastifikační přísady na bázi organických sloučenin, mezi které podle Pytlíka [69] patří:

- soli nebo deriváty ligninsulfonanů (LS),
- estery polykarboxylových kyselin (PC),
- sulfonované naftalenformaldehydové kondenzáty (SNF),
- sulfonované melaminformaldehydové kondenzáty (SMF),
- kopolymery karboxylové kyseliny s akrylesterem (CAE).

Doporučené dávkování plastifikačních a superplastifikačních přísad se pohybuje v rozmezí od 0,2 % do 5 % z hmot. cementu. Dávka přísad se liší na základě druhu a účelů použití betonů (čerpaný beton, beton tuhé či měkké konzistence,...). S tím souvisí i množství a druh použitého cementu ve směsi a někdy i klimatické podmínky při aplikaci betonu. Z těchto důvodů je vhodné a někdy i nutné ověřit vhodnost použití plastifikačních a superplastifikačních přísad experimentálně. [69, 70]

V keramickém průmyslu se pro ztekucení tzv. licích břechek používají podle Sokoláře [71] Hanykýře a kol. [72] ztekucovadla, které fungují na dvou principech:

- ztekucování pomocí elektrolytů na bázi výměny kationtů,
- ztekucení ochrannými koloidy.

Do první skupiny ztekucovadel patří:

- bezvodá soda Na_2CO_3 ,
- vodní sklo Na_2SiO_3 ,
- hexametafosforečnan sodný $\text{Na}_6(\text{PO}_3)_6$,
- polyfosforečnan sodný $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$,
- šťavelan amonný $\text{Na}_2(\text{COO})_2$.

Druhou skupinu tvoří: huminové kyseliny, lignosulfonan sodný nebo karboxymetylceluloza. Množství použitého ztekucovadla se optimalizuje pomocí měření viskozity. [71]

Urychlovače tuhnutí a tvrdnutí. Pro úpravu vlastností samozhutnitelných zálivek mohou být používány i další druhy přísad, např. to se může jednat o urychlovače tuhnutí a tvrdnutí. Z hlediska fyzikálně chemických procesů, probíhajících v různých fázích hydratace minerálů v zrnech cementu, jsou tyto dva pojmy naprosto odlišné. Ovšem většina urychlujících přísad spojuje oba účinky a v případě, že je zkrácení a počátku a doby tuhnutí nežádoucí, je potřeba opatrného dávkování, případně použití dalších přísad, vždy ovšem s ohledem na

reologii a zpracovatelnost směsi. Mezi nejčastější používané urychlovače tuhnutí patří přísady na bázi chloridu vápenatého. Využívány jsou především z toho důvodu, že jsou vysoce účinné, a kromě urychlení tvrdnutí zároveň zkracují počátek a dobu tuhnutí. [73] Studium použití chloridu vápenatého se věnovali ve své publikaci Rixoma a kol. [74] a zjistili, že mezi C_3S , C_2S a chloridem vápenatým nedochází k žádné chemické reakci, i přes to, že docházelo k vývoji počátečních pevností. Rixom a kol. k tomu dodali, že chlorid vápenatý nijak výrazně nereaguje s cementovou pastou v průběhu prvních 2 až 6 hodin po smíchání. Vznik nových produktů hydratace bylo spíše pozorováno mezi C_3A , sádrou a chloridem vápenatým. Tyto hydratační produkty ovlivňují chování směsi a přispívají k vyšší pevnosti.

Podle Táboorského a kol. [73] mohou být dále pro urychlení tuhnutí a tvrdnutí používány tzv. bezchloridové přísady, kterými jsou:

- *přísady na bázi thiokyanatanů*, jejichž základní složkou je thiokyanatan sodný ($NaSCN$) nebo vápenatý ($Ca(SCN)_2$),
- *přísady na bázi dusičnanů*, jejichž hlavní složkou je většinou dusičnan vápenatý ($Ca(NO_3)_2$),
- *alkalické přísady*, které obsahují hydroxidy nebo uhličitany alkalických kovů,
- *přísady s obsahem síranu draselného* (K_2SO_4).

Použití přísad, při návrhu samozhutnitelných zálivek, je ve většině případů výrobců tzv. „know how“. Ve světové praxi můžeme najít firmy, které se zaměřují na výrobu samozhutnitelných zálivek, ovšem jejich přesné receptury nejsou zcela známé či dostupné. Obecně požadavky na použití množství a druhů materiálů či přísad pro návrh samozhutnitelných zálivek lze najít v normových požadavcích. V praxi ovšem zjistíme, že i když existují jistá doporučení, musí se parametry zálivek upravit vždy na míru konkrétního použití. I přes to, že patří samozhutnitelné zálivky do skupiny tzv. hybridních materiálů a v běžné praxi, především v ČR nejsou používány, mohou mít řadu výhod.

1.3.4 Výhody použití samozhutnitelných zálivek

Výhod použití samozhutnitelných zálivek je hned několik:

- ***Snížení problémů s aplikací v omezeně přístupných místech.*** Žlaby či čerpací zařízení umožňují možnost aplikace samozhutnitelných zálivek i do těch nejméně přístupných míst.

- **Rychlost.** Rychlé vypouštění samozhutnitelné zálivky ze skluzu/žlabu nebo čerpadla a rychlá aplikace bez nutnosti hutnění minimalizuje čas nutný pro uzavření silnice, chodníku atd.
- **Úzké výkopy.** Technologie aplikace samozhutnitelné zálivky umožňuje její použití i v užších výkopech.
- **Zvýšení bezpečnosti pracovníků.** Pracovníci při aplikaci samozhutnitelné zálivky nemusí vstupovat do výkopů, aby je zaplnili samozhutnitelnou zálivkou, čímž se snižuje nutnost expozice pracovníků v zúžených prostorech.
- **Snížení množství zařízení.** Na rozdíl od zhutněných zemin lze samozhutnitelné zálivky umístit do výkopů bez použití nakladačů, zhutňovacích zařízení a bez nutnosti přítomnosti stavebního dozoru.
- **Eliminace skládkování zeminy a uložení kameniva.** Ve srovnání s technologií zhutňování nedochází u aplikace samozhutnitelných zálivek ke vzniku odpadu a nutnosti skládkování. Samozhutnitelnou zálivku je možné aplikovat do výkopu hned jak je to nutné.
- **Všestrannost návrhu samozhutnitelné zálivky.** Složení samozhutnitelné zálivky lze upravit tak, aby splňovala konkrétní požadavky. U zálivek lze upravit tekutost směsi, urychlit či zpomalit počátek tuhnutí, snížit objemovou hmotnost zálivky přidáním pěnotvorných přísad atd.
- **Menší riziko poškození potrubí či jiného inženýrského vedení.** Ve srovnání s klasickou technologií zhutňování je při provádění plnění výkopu samozhutnitelnou zálivkou menší pravděpodobnost, že dojde k porušení inženýrských sítí (potrubí).
- **Snadné dodání a umístění.** Autodomíchávače mohou dodat hotovou směs v požadovaném množství. Samozhutnitelné zálivky lze pomocí skluzů a čerpadel umístit i na vzdálenější a méně přístupná místa. Aplikace samozhutnitelné zálivky nevyžaduje zhutňovací zařízení (vibrátory). Umístění zálivky je rychlé a zpravidla vyžaduje pouze jednu osobu, aby nasměrovala žlab.
- **Pevnost a odolnost.** Hodnota pevnosti v tlaku samozhutnitelné zálivky může být vyšší než při provádění zhutnění agregátu (kameniva, zeminy). Samozhutnitelné zálivky jsou zároveň méně propustné a tím více odolné vůči erozi.
- **Sedání v čase.** Samozhutnitelné zálivky nevyžadují žádnou údržbu (dohutnění, doplnění,...). Během aplikace se nevyskytují žádné prázdné prostory a nedochází k sedání při působení dopravního zatížení.

- **Lze je snadno vykopat/vyhloubit.** S pevností v tlaku 1 až 1,5 MPa samozhutnitelných zálivek je lze vyhloubit pomocí běžných nástrojů pro kopání zeminy.
- **Eliminace odvodnění.** Samozhutnitelné zálivky vytlačují jakoukoliv vodu stojící ve výkopu.
- **Identifikace inženýrských sítí.** Samozhutnitelná zálivka může být obarvena, aby pomohla při identifikaci inženýrských sítí v každém konkrétním výkopu. [58, 75]

I přes všechny výše zmíněné výhody a potenciál použití samozhutnitelných zálivek, lze konstatovat, že ve srovnání se zhutněnou zeminou, není v současné době jejich využití až tak běžné. Možným problémem může být podle Smitha [76] fakt, že samozhutnitelné zálivky patří do skupiny tzv. „hybridních materiálů“, které nelze identifikovat ani jako beton ani jako zhutněnou zeminu. V některých případech jsou tyto samozhutnitelné zálivky označovány jako „cementový materiál, který se chová jako zhutněná zemina“. Z toho vyplývá, že lze tyto materiály zkoušet jak pomocí normových požadavků určených pro beton, tak pomocí normových požadavků určených pro zhutněné či stabilizované zeminy. [76]

1.3.5 Použití a aplikace samozhutnitelných zálivek

I přes to, jak velký potenciál by samozhutnitelné zálivky mohly mít, není jejich použití v současné době velmi rozšířené. Jak již bylo zmíněno výše, omezenost jejich použití vyplývá především z toho, že se jedná o tzv. „hybridní cementový materiál“, který mnohdy nelze zařadit ani do kategorie betonových materiálů a ani do geotechnického inženýrství. Některé specifikace, které by měly obecně samozhutnitelné zálivky splňovat, jsou navíc upravovány podle různých států jinak. S tím souvisí i to, že nejsou v současné době jasné specifikovány normové požadavky, které by sloužily pro ověřování vlastností těchto zálivek. Tento rozpor se specifikacemi a zkušebními metodami by mohl být překážkou v jejich možnosti použití. [77] Navzdory výhodám samozhutnitelných zálivek, ve srovnání se zhutněnou zeminou, by si ovšem tento druh materiálu měl zasloužit mnohem větší úroveň pozornosti.

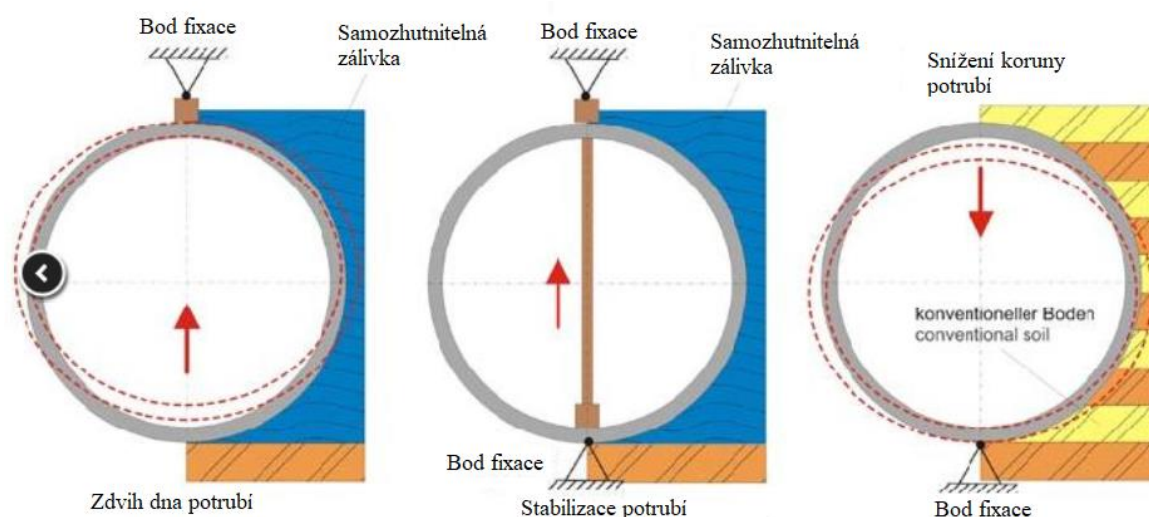
Pro to, aby se zvýšila možnost použití samozhutnitelných zálivek, by se inovace tohoto druhu materiálu měly zaměřit na jejich vyšší kvalitu a ověřování jejich vlastností, které budou v souladu s dostupnými normovými zkušebními metodami. Tím by se zvýšila jejich možnost použití i v oblasti výkopových prací, se kterou se doposud, až na výjimky, běžně nepočítalo. [78, 79]

Navzdory výše zmíněným problémům existují státy, kde se za určitých podmínek samozhutnitelné zálivky používají. Obecně se použití samozhutnitelných zálivek dá podle

Tikalskeho a kol. [80] rozdělit na dvě kategorie, kterými jsou: konstrukční výplně (základové desky, podstavce, podlahy atd.) a výplňový materiál (inženýrských sítí, mostních opěr, opěrných zdí, příkopů atd.), který má nahradit zhutněnou zeminu. Další možnost použití samozhutnitelných zálivek je možná např. jako výplň opuštěných podzemních skladovacích nádrží, studen, skládek odpadů, kanalizačních šachet apod. [81, 82]

Použití samozhutnitelných zálivek vyžaduje pečlivé plánování, přípravu staveniště a postupnost kroků při aplikaci. Splnění všech požadavků vyžaduje značné úsilí, jistou zkušenost a odbornost. Z těchto důvodů bývá ve většině případů prováděna aplikace samozhutnitelných zálivek firmami jakožto „kompletní zakázka“ veškerých prací, které zahrnují přípravu, nakládání/vykládání materiálu, míchání směsi, ukládání potrubí, aplikaci zálivky atd.

Přípravné práce, pře samotnou aplikaci samozhutnitelné zálivky, souvisí především se zajištěním inženýrských sítí (trub – vodovodních, kanalizačních, atd.) tak, aby nedošlo k jeho vyplavení. Trouby se proto po celé délce koruny a ve spodní části pevně uchycují k podkladu pomocí tzv. ocelových zámků (Obr. 21). V některých případech se pro zajištění trub vkládají podpory i do jejich vnitřních částí. Tento způsob úpravy se provádí především z toho důvodu, aby nedocházelo k deformaci trub (viz Obr. 21). V případě, že je na staveništi provedena pečlivá příprava postupu montáže trub je možné tyto „systémové požadavky“ vynechat. [42]



Obr. 21: Upevnění trub (potrubí) [42]

Pro míchání samozhutnitelných zálivek se používají stejná zařízení jako pro výrobu samozhutnitelného betonu. Výroba samozhutnitelných zálivek může být prováděna přímo

na staveništi pomocí tzv. mobilních zařízení nebo ve firmách a na stavenišťe dovážena pomocí autodomíchávačů. Mobilní zařízení se většinou skládá ze dvou sil (kontejnerů) pro uložení pojiv a případně dalších skladovacích nádob pro přísady. V případě, že není na staveništi zajištěn zdroj vody z vodovodního řádu, bývají mobilní zařízení dále doplněny o nádobu na vodu. Z těchto nádob je voda čerpána pomocí čerpadel přímo do míchačky. Pro dokonalé rozmísení samozhutnitelných zálivek se pro míchání upřednostňuje použití míchaček s vysokou míchací energií. Pro čerpání zálivek na určené místo se používají stejné čerpací zařízení, jako při výrobě betonu. Výsledkem je vysoce efektivní zařízení sloužící pro výrobu samozhutnitelných zálivek. Teoretický výkon takovýchto zařízení, v souvislosti s typem agregátu (jemného kameniva, zeminy) a obecně složením receptury, by měl být cca $25 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ až $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. [83]

Podle WBM-Flüssigboden [83] se pro bližší specifikaci technického (mobilního) zařízení doporučuje, aby mělo následující parametry:

- 2 sila s kapacitou cca 3 tun (v závislosti na vlastnostech pojiva),
- skladovací kapacitu na staveništi (v závislosti na receptuře a místních podmínkách) na cca 50 až 80 m^3 samozhutnitelné zálivky,
- dávkovače pojiv a přísad s přesností ne více jak $\pm 2 \%$,
- míchačky s vysokou míchací energií (pro vytvoření homogenní směsi), kapacity alespoň pro 1 m^3 každé dávky,
- zařízení sloužící pro přidání vápna,
- zařízení neobsahující žádné časově náročné transportování směsi,
- zařízení umožňující změnu množství a konzistence pro každou dávku zvlášť,
- možnost rychlé a snadné přestavby (jednoduché zařízení na vozíku či jiných pokladech umožňujících jejich přepravu).

2 CÍLE PRÁCE

V současnosti jsou „CLSM“ či tzv. „flowable fill“ navrhovány a používány na bázi jemnozrnného kameniva, cementu, alternativních surovin a vody. Unikátní proto bude při návrhu tzv. „flowable fill“ použití zemin. Z tohoto důvodu bude dominantním cílem disertační práce vyvinout novou pokročilou technologii zpětného využití zemin ve formě samozhutnitelné zálivky, která by mohla nahradit stávající technologii zhutňování zemin.

Při návrhu receptur samozhutnitelných zálivek, určených pro snadné vyplnění prostoru kolem inženýrských sítí, bude kladen důraz na využitelnost různých typů zemin, v kombinaci s dalšími materiály upravující jejich vlastnosti tak, že lze tyto zeminy zpětně využít v konstrukci, aniž by končily na skládkách odpadů. Z environmentálního hlediska tímto dojde k výrazné úspoře přírodních zdrojů a nutnosti skládkování zemin.

Jedním z dílčích cílů této disertační práce bude volba ideálního složení samozhutnitelné zálivky, což bude realizováno na základě vyhodnocení a optimalizace výsledků laboratorních zkoušek. Spektrum testovaných vlastností bude zvoleno tak, aby nejlépe simulovalo požadované vlastnosti samozhutnitelné zálivky. Dalším z dílčích cílů celého výzkumu u nově vyvíjeného materiálu bude nutnost experimentálně stanovit možnosti jeho aplikace bez nutnosti vibrace či zhutňování. Tento fakt umožní aplikaci nově vyvíjeného materiálu i v těch nejméně přístupných místech. Srovnáním výsledků testování nově vyvinutých samozhutnitelných zálivek bude rovněž možné posoudit vliv různých materiálových složek na výsledné vlastnosti zálivky.

Vzhledem k tomu, že pro funkčnost a vůbec pro vznik vlastní samozhutnitelné zálivky je bezpodmínečně nutná dostatečná tekutost a následný vývoj pevnosti v čase, tak dalším významným dílčím cílem této disertační práce bude objasnění vlivu synergického působení ztekucujících či plastifikačních přísad s minerály obsaženými v různých typech zemin. Výsledky výzkumu budou vytvořeny na základě poznatků získaných z vědeckého zkoumání a při využití ostatních vědeckých poznatků současnosti. Zjištěná fakta o samozhutnitelných zálivkách budou přínosné pro široké spektrum geotechnických prací a budou v mnoha směrech unikátní.

Přínosem pro praxi, ve srovnání se stávajícími technologiemi, především zhutňováním zemin, bude návrh nové technologie, která může šetřit zdraví pracovníku, čas a použití či aplikovatelnost v různých typech konstrukcí.

II. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3 METODIKA PRÁCE

Disertační práce bude vzhledem k jejímu rozsahu a v zájmu její přehlednosti rozdělena do čtyř na sebe navazujících etap řešení, jejichž věcná náplň je podrobně rozepsána v následujících kapitolách. Dále je pak v rámci metodiky práce uveden přehled a princip všech prováděných analýz, které bylo zapotřebí provést v návaznosti na řešení této disertační práce.

3.1 Specifikace jednotlivých etap řešení

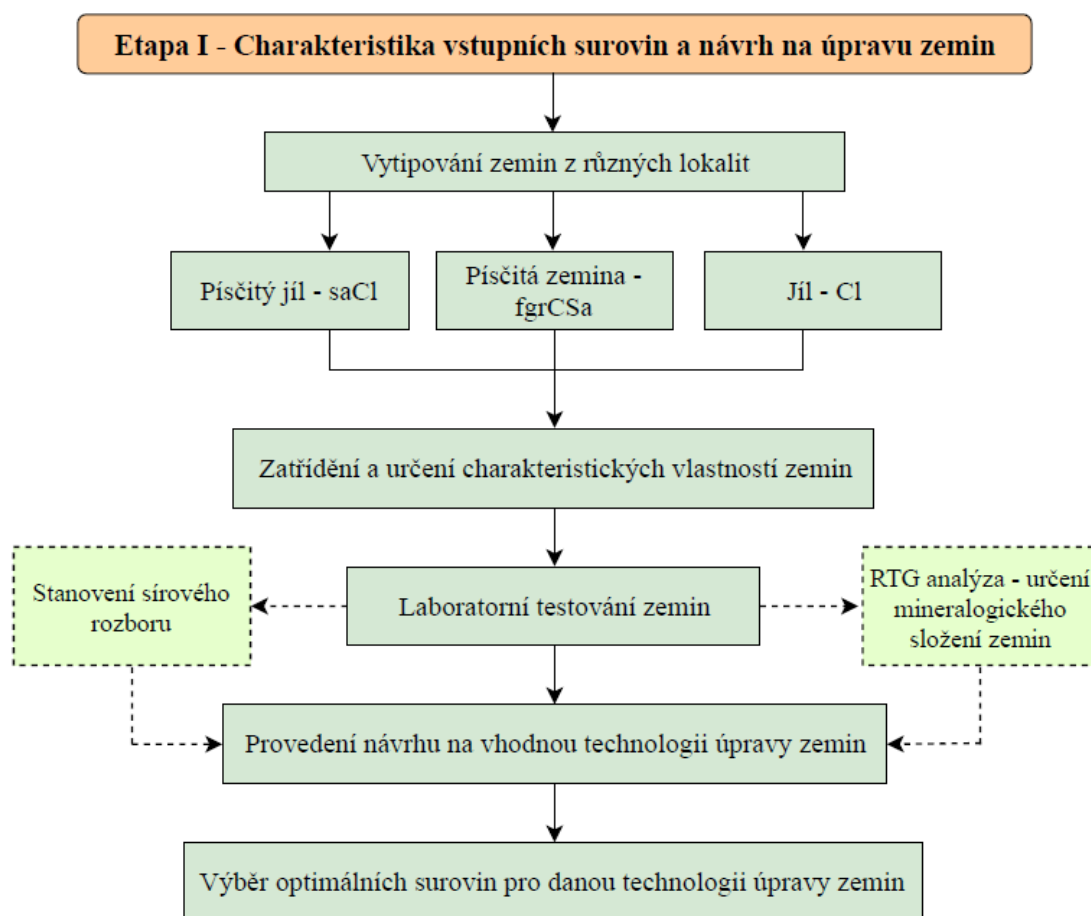
3.1.1 Etapa I - Charakteristika vstupních surovin a návrh na úpravu zemin

Vzhledem k tomu, že je disertační práce zaměřena na vývoj nové technologie zpětného využití zemin ve formě samozhutnitelných zálivek, bude I. etapa disertační práce zaměřena na vlastnosti a charakterizaci primární suroviny, kterou je právě zemina. Snahou disertační práce bude využít co největší množství různých typů zemin, a proto bude jejich výběr zaměřen na zastoupení jak jílovité, hlinité, tak písčité zeminy. Díky geologické rozmanitosti výskytu různých druhů a typů zemin na území České republiky bude vytipování zemin zaměřeno na oblast Brna a jeho okolí, a to především z toho důvodu, že podle geologické mapy se na tomto území nachází téměř všechny druhy a typy zemin.

Z různých lokalit budou odebrány vzorky tří druhů zemin, na kterých se provede určení jejich vlastností a zařídění podle platných norem. Pojmenování, popis a klasifikace zemin bude určeno na základě normy ČSN EN ISO 14689 [15]. Poté bude provedeno zařídění zemin podle ČSN EN ISO 14688-1 [12] a ČSN EN ISO 14688-2 [13]. Pro podrobnější specifikaci budou následně u zemin stanoveny další vlastnosti, mezi které patří např. zrnitost, konzistenční meze, index plasticity, vlhkost, číslo nestejnozrnitosti, číslo křivosti atd.. Vzhledem k povaze materiálu, kterým je právě zemina a díky jejímu použití bude za nejdůležitější specifický parametr považována zrnitost zeminy. Z tohoto parametru bude totiž možné určit nejen zastoupení jednotlivých frakcí, které ovlivňují její vlastnosti, ale také např. koeficient propustnosti a náchylnost zeminy na promrzání. Pro zjištění množství minerálů nacházejících se v zemině bude taktéž provedena zkouška rentgenové difrakční analýzy (RTG difrakční analýzy). Na základě pojmenování, popisu, klasifikace, zařídění, určení vlastností zeminy a zjištění mineralogického složení bude následně navržena vhodná technologie úpravy.

Při návrhu možností úpravy zemin bude nutné vycházet z toho, k jakému účelu bude zemina využita, respektive z požadavků, které musí splňovat pro to, aby mohla být zpětně použita v konstrukci. Díky vlastnostem a povaze materiálu, kterým je právě zemina a na základě již stávajících možností úpravy zemin bude proto její ošetření zaměřeno na stabilizaci a ztekucení. Úprava zeminy formou stabilizace bude navržena na základě doporučení vycházejících z ČSN 73 6133 [16] a technických podmínek TP 94[20]. Technologie ztekucení zemin bude navržena jako nový druh možnosti úpravy zemin pro jejich zpětné použití v samozhutnitelné formě.

Na základě zjištěných poznatků o možnostech úpravy zemin bude následně proveden výběr optimálních a dostupných surovin, které lze využít při návrhu samozhutnitelných zálivek. Výběr surovin bude proveden jak s ohledem na používaný typ zemin, tak aby byla zajištěna vzájemná synergie mezi jednotlivými složkami, výrazně se nezvyšovala cena, suroviny byly dostupné na našem trhu a výsledná směs splňovala požadované parametry. Schéma řešení etapy I je znázorněno na Obr. 22.



Obr. 22: Schéma postupu řešení předkládané disertační práce – Etapa I

3.1.2 Etapa II – Sledování vlivu stabilizačních činidel při návrhu samozhutnitelných zálivek

Na základě zjištěných poznatků o vlastnostech a možnostech úpravy zemin z první etapy, bude druhá etapa výzkumných prací zaměřena na stabilizaci. Tento první krok úpravy zemin bude zvolen především díky k tomu, že zeminy mohou ve větší či menší míře obsahovat jílové minerály, které by mohly jak negativně, tak pozitivně ovlivnit výsledné vlastnosti samozhutnitelných zálivek. Především se může jednat o vliv na reologické vlastnosti směsi a vývoj pevnosti v čase. Z těchto důvodů bude nutné ověřit účinek stabilizačních činidel s jednotlivými typy zemin.

Pro zjištění účinku reakce mezi zeminou (jejími jílovými minerály), stabilizačním činidlem (vápna a cementem) a vodou, bude proto navržena řada receptur. Při návrhu a ověřování receptur, bude zvláštní pozornost věnována struktuře samozhutnitelné zálivky, od které se odvíjejí její konečné fyzikálně mechanické vlastnosti. Zřetel bude kladen také na zpracovatelnost a vývoj pevnosti v tlaku samozhutnitelné zálivky. Postupně budou ověřovány kombinace směsí složených nejprve ze zeminy a 1,5 % a 3,0 % vápna. Následně bude ověřován účinek 2 %, 4 %, 6 % a 8 % cementu se zeminou. Na závěr budou ověřeny receptury, u kterých se provede kombinace zeminy, vápna a cementu. Účinek pojiv na stabilizaci zemin bude sledován jak v čerstvém stavu (hned po zamíchání), tak v zatvrdlém stavu (po určité době zrání).

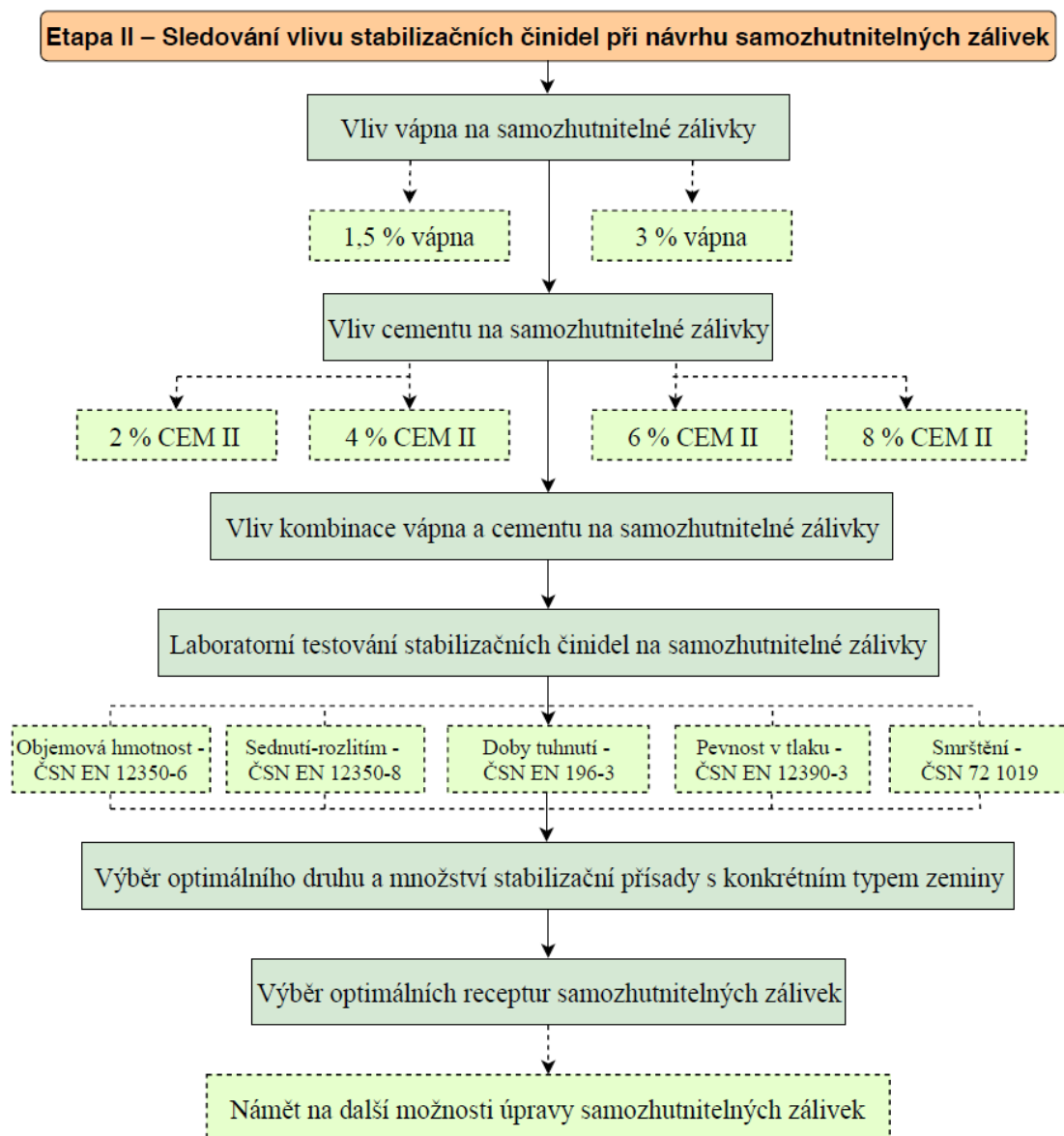
Při sledování účinku vápna na zeminu bude pozornost věnována především kationtové výměně a flokulaci, které nastávají bezprostředně po smíchání zeminy s pojivem, dále hydrataci, jež nastává při smíchání vápna s vodou a pucolánovým reakcím, které se vyskytují po smíchání pojiva se zeminou až po delší době (měsíce až roky). Tyto reakce mohou ovlivnit změnu textury zeminy (např. z plastické na zrnitou), vlhkost, zpracovatelnost a pevnosti.

V případě cementu bude pozornost, při jeho účinku na stabilizaci zemin, věnována především hydratačním dějům a dokonalému promíchání. Obecně budou hydratační děje mezi zeminou, cementem a vodou sledovány na vývoji pevnost v tlaku po určité době zrání (7, 14, 28 a 90 dnech).

Ověřování účinku pojiv (vápna, cementu), při návrhu receptur, jak v čerstvém, tak v zatvrdlém stavu, bude prováděno v souladu s normovými požadavky a parametry, které jsou na samozhutnitelné zálivky, neboli tzv. „flowable fill“ kladeny.

Proto se na navržených recepturách bude provádět zkouška sednutí-rozlítím podle ČSN EN 12350-8 [84], objemové hmotnosti v čerstvém stavu podle ČSN EN 12350-6 [86], stanovení dob tuhnutí podle ČSN EN 196-3 [87], objemové hmotnosti v zatvrdlém stavu podle ČSN EN 12390-7 [88], pevnosti v tlaku podle ČSN EN 12390-3 [89] a smršťování podle ČSN 72 1019 [90].

Na základě zjištěných dat bude proveden návrh optimálního druhu a množství stabilizační přísady (vápna, cementu) s konkrétním typem zeminy. Na vybraných recepturách budou provedeny analýzy mikrostruktury. Z dosažených výsledků II. etapy bude proveden námět na další možné úpravy samozhutnitelných zálivek. Schéma řešení etapy II je znázorněno na Obr. 23.



Obr. 23: Schéma postupu řešení předkládané disertační práce – Etapa II

3.1.3 Etapa III – Sledování vlivu dalších druhů přísad a příměsí při návrhu samozhutnitelných zálivek

Proces úpravy zemin pomocí stabilizace je při návrhu samozhutnitelných zálivek nezbytným krokem, který vede k získání směsi, jež má určité parametry. Na základě použitých surovin by se dalo konstatovat, že lze získat samozhutnitelnou zálivku, která bude splňovat požadavky pro její použití v konstrukci. Obecně je však pro dosažení požadovaných parametrů samozhutnitelných zálivek vhodné použití také dalších druhů přísad či příměsí, které mohou tyto parametry ještě zlepšovat. Především je důležité se zaměřit na ztekucení samozhutnitelné zálivky, která, jak je uvedeno v popisu předchozí Etapy II, bude provedena pouze pomocí vody.

Proto bude třetí etapa výzkumných prací zaměřena na ověření účinku dalších druhů přísad a příměsí, které mohou vést k získání optimálních vlastností samozhutnitelných zálivek (především pak snížení množství vody, zlepšení zpracovatelnosti, schopnosti tečení zálivky a urychlení počátku a doby tuhnutí). Z hlediska praxe a na základě zjištěných poznatků o tom, že buď není běžné užívání přísad při návrhu samozhutnitelných zálivek, nebo se jedná o tzv. „know how“ bude proto snahou se použitím těchto materiálů zabývat.

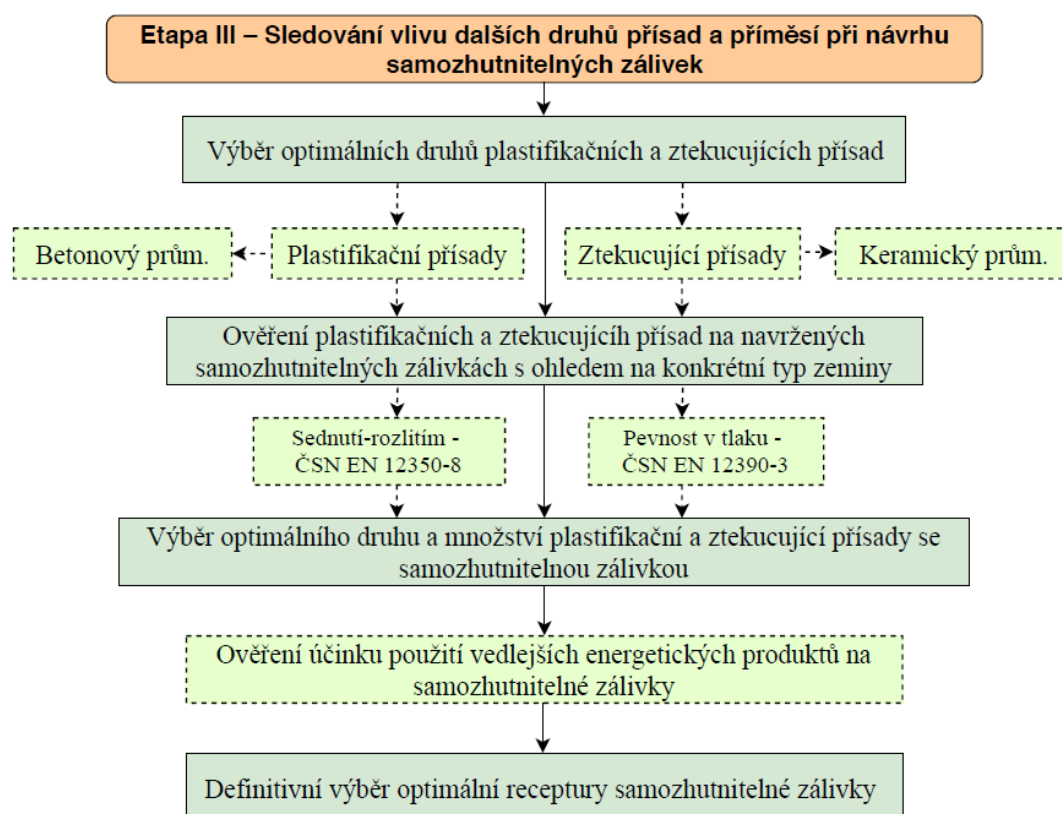
Pro dosažení lepších reologických vlastností směsí budou navrženy receptury, ve kterých se ověří různé druhy a množství plastifikačních a ztekucujících přísad. Vzhledem k tomu, že samozhutnitelné zálivky patří mezi tzv. „hybridní materiál“, který nelze posuzovat ani jako beton, ani jako zhutněnou zeminu či jinou cementovou zálivku, bude výběr vhodných přísad (plastifikačních, ztekucujících) proveden s ohledem na daný typ zeminy, množství a druh použitého pojiva. V rámci navržených receptur bude ověřováno množství 1 %, 2 % a 3 % plastifikační přísady (z hmot. cementu, na bázi polykarboxylátů) a 0,04 % až 10 % ztekucující přísady (z hmot. zeminy, na bázi výměny kationtů).

Ověřován bude orientačně i účinek použití druhotných surovin a to zejména vedlejších energetických produktů, které mohou ovlivnit jak reologické vlastnosti, tak proces vytvrzování. Množství vedlejších energetických produktů bude voleno s ohledem jak na ekonomické, tak na environmentální parametry. Ověřovaným množstvím bude 5 %, 10 %, 30 % a 60 % (z hmotnosti zeminy) vedlejších energetických produktů.

Ověřování účinku přísad (plastifikačních, ztekucujících) a příměsí (vedlejších energetických produktů), při návrhu receptur, jak v čerstvém, tak v zatvrdlém stavu, bude prováděno v souladu s normovými požadavky a parametry, které jsou na samozhutnitelné

zálivky kladeny. Proto se na navržených recepturách bude provádět zkouška sednutí-rozlítím podle ČSN EN 12350-8 [84], objemové hmotnosti v čerstvém stavu podle ČSN EN 12350-6 [86], stanovení dob tuhnutí podle ČSN EN 196-3 [87], objemové hmotnosti v zatvrdlém stavu podle ČSN EN 12390-7 [88], pevnosti v tlaku podle ČSN EN 12390-3 [89] a smršťování podle ČSN 72 1019 [90].

Na základě zjištěných dat ze třetí etapy budou následně vybrány optimální receptury samozhutnitelných záливоek s konkrétními druhy a množstvím pojiv (vápna, cementu), přísad (plastifikačních, ztekucujících, urychlovačů tuhnutí a tvrdnutí) a vedlejších energetických produktů, s ohledem na daný typ zeminy. Schéma řešení III etapy je znázorněno na Obr. 24.



Obr. 24: Schéma postupu řešení předkládané disertační práce – Etapa III

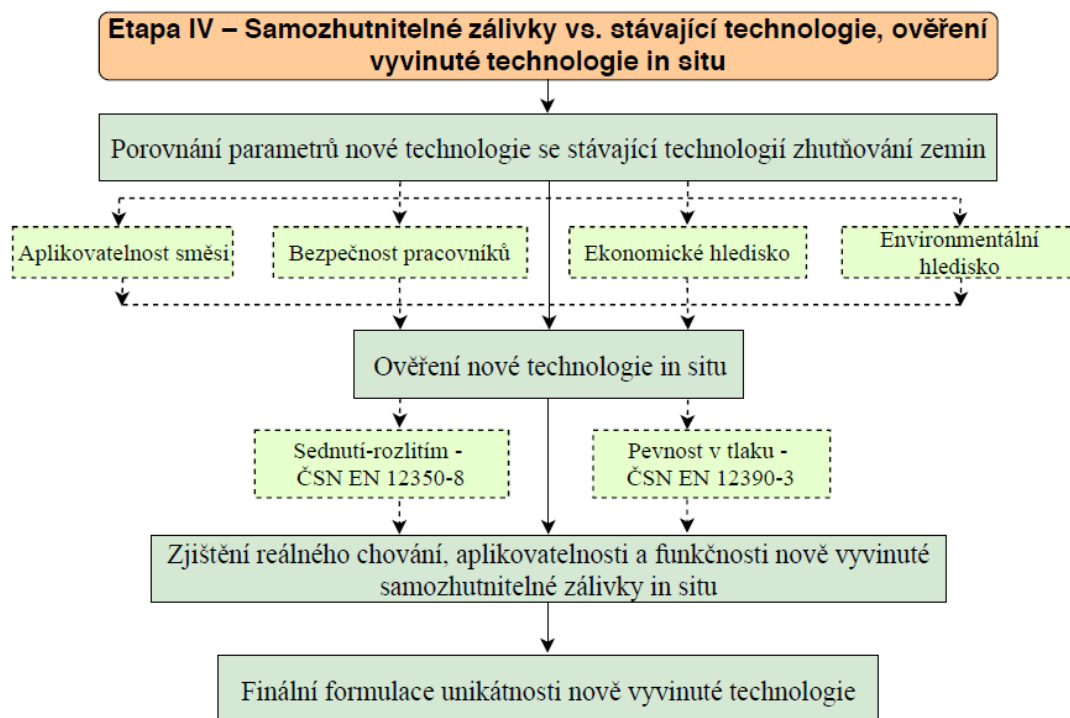
3.1.4 Etapa IV – Samozhutnitelné zálivky vs. stávající technologie, ověření vyvinuté technologie in situ

Čtvrtá etapa bude zaměřena na porovnání parametrů nové technologie zpětného využití zemin ve formě samozhutnitelných záливоek se stávajícími technologiemi provádění výkopů inženýrských sítí. Vzhledem k současné praxi se porovnání nové technologie bude vztahovat především na zhutňování zemin (štěrků, písků, štěrkopísku apod.), jakožto nejčastěji

používanou metodu provádění zásypů výkopů IS. Důvodem, proč se nová technologie vztahuje především na oblast provádění výkopů inženýrských sítí je fakt, že v rámci těchto prací dochází k největší produkci výkopových zemin, které díky tomu, že nesplňují požadavky pro jejich zpětné využití v konstrukci, končí na skládkách odpadů. Nový způsob úpravy zemin ovšem vede mimo jiné k možnosti jejich využití, bez nutnosti skládkování.

Z hlediska porovnání parametrů samozhutnitelných zálivek vs. zhutňování zemin bude brán zřetel především na eliminaci skládkování zemin, aplikovatelnost směsi, zvýšení bezpečnosti pracovníků, ekonomické a environmentální hledisko.

Pro zjištění reálného chování vyvíjených samozhutnitelných zálivek bude v rámci čtvrté etapy zároveň provedeno ověření nové technologie zpětného využití zemin ve formě samozhutnitelných zálivek in situ. Na základě zjištěných poznatků z předchozích etap bude pro ověření vybrána samozhutnitelná zálivka optimálních vlastností, která se aplikuje do určeného výkopu. Veškeré práce budou probíhat na staveništi za použití dostupných zařízení. Na staveništi se pro zajištění parametrů směsi, především optimální hodnoty rozlití, provede zkouška sednutí-rozlitím podle ČSN EN 12350-8 [84]. Pro laboratorní ověření budou ze směsi odebrány vzorky, na kterých se stanoví pevnosti v tlaku po určité době zrání. Závěrem IV etapy bude finální formulace unikátnosti nově vyvinuté technologie. Schéma řešení etapy IV je znázorněno na Obr. 25.



Obr. 25: Schéma postupu řešení předkládané disertační práce – Etapa IV

3.2 Metody prováděných zkoušek

Samozhutnitelné zálivky se obecně označují jako materiály s nízkou pevností tzv. „CLSM“ (Controlled Low Strength Material), které jsou obvykle složeny z jemného kameniva, pojiv, vody a chemických přísad. Obecně jsou CLSM označovány za tzv. specifický typ materiálu (někdy také „hybridní materiál“, či „cementový materiál, jež se chová jako zhutněná zemina“), který nelze identifikovat ani jako beton ani jako zhutněnou zeminu. S tím souvisí i samotné zkoušení těchto zálivek. Na základě zjištěných poznatků lze konstatovat, že pro tento typ materiálu neexistují přesně dané normové zkoušky. Proto lze tyto materiály zkoušet jak pomocí normových zkoušek určených pro beton, tak pomocí normových zkoušek určených pro zhutněné či stabilizované zeminy, případně pomocí normových zkoušek určených pro keramický průmysl.

Obecně se při návrhu samozhutnitelných zálivek doporučuje vycházet ze zkoušek, které jsou uvedeny v normách ASTM, mezi něž patří zkoušky ověřující jak chování směsi v čerstvém, tak v zatvrdlém stavu (viz Tab. 12). Konkrétní druhy zkoušek jsou následně upravovány tzv. na míru konkrétních států.

Tab. 12: Zkušební metody samozhutnitelných zálivek podle ASTM [62]

Vlastnost	Zkušební metoda	Norma
Vývoj pevnosti	Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil	ASTM D2166
	Unconfined Compressive Strength Index of Chemical-Grouted Soils	ASTM D4219
Tekutost	Slump of Portland Cement Concrete	ASTM C143
	Flow of Grout for Preplaced-Aggregate (Flow Cone Method)	ASTM C939
Doba tuhnutí	Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance	ASTM C403
Bleeding a smrštění	Change in Height at Early Ages of Cylindrical Specimens from Cementitious Mixtures	ASTM C827
Objemová hmotnost	Unit Weight, Yield, and Air Content of Concrete	ASTM C138
Únosnost	California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compactive Soils	ASTM D1883

V návaznosti na americké standardy se při ověřování vlastností samozhutnitelných zálivek v evropských zemích, konkrétně tedy v ČR, vycházelo ze zkušebních metod, jež jsou uvedeny v následující Tab. 13.

Tab. 13: Zkušební metody určené pro samozhutnitelné zálivky

ČSN	Název normy
ČSN EN 12350-8	Zkoušení čerstvého betonu - Část 8: Samozhutnitelný beton - Zkouška sednutí-rozlitím
ČSN EN 12350-6	Zkoušení čerstvého betonu - Část 6: Objemová hmotnost
ČSN EN 196-3	Metody zkoušení cementu - Část 3: Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti
ČSN EN 12390-7	Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu
ČSN EN 12390-3	Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles
ČSN 72 1019	Laboratorní stanovení smršťování zemin

3.2.1 Stanovení sednutí-rozlitím

Vzhledem k tomu, že se konzistence samozhutnitelných zálivek může, ve srovnání se standardně vyráběnými směsmi, jako jsou betony či malty, pohybovat od plastického betonu až po cementovou maltu, lze tekutost posuzovat podle metodiky zkoušek určených jak pro beton, tak pro injektážní směsi. Pro zvolení metody zkoušení je důležitá velikost zrn směsi. V případě samozhutnitelných zálivek se velikost zrn pohybuje až do 32 mm, proto se pro stanovení konzistence použila metoda zkoušení podle ČSN EN 12350-8 Zkoušení čerstvého betonu – Část 8: Samozhutnitelný beton – Zkouška sednutí – rozlitím [84] (Obr. 26).



Obr. 26: Podkladní deska a kužel pro stanovení zkoušky sednutí-rozlitím

Výsledkem zkoušky sednutí-rozlitím (SF) je průměrná hodnota měření d_1 a d_2 (viz vzorec (7)), zaokrouhlена na nejbližších 10 mm (viz Tab. 14).

$$SF = \frac{(d_1 + d_2)}{2} \text{ [mm]} \quad (7)$$

kde SF... sednutí-rozlitím [mm],

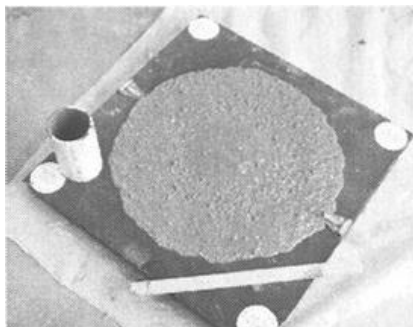
d_1 ... největší průměr rozlití [mm],

d_2 ... průměr rozlití ve směru kolmém k d_1 [mm].

Tab. 14: Hodnoty třídy sednutí-rozlitím SF [84]

Třída	Rozlití [mm]
SF1	550 - 650
SF2	660 - 750
SF3	760 - 850

Kromě výše zmíněné metody, která je obdobou zkoušky prováděné podle ASTM C 143 se pro stanovení konzistence samozhutnitelných zálivek také využívá zkouška pomocí tzv. „průtokového válce s otevřeným dnem“ (ASTM D 6103-96) (Obr. 27). Tato zkouška se používá pro stanovení konzistence samozhutnitelných zálivek menších objemů (cca 663 ml), o maximální velikosti částic do 19,0 mm. Pro provádění zkoušky se používá válec o výšce 150 ± 3 mm a průměru 76 ± 3 mm. Zkouška rozlití směsi musí být zahájena do 5 minut, pro získání optimální konzistence směsi. Dokončení celé zkoušky, od začátku plnění válce až po odstranění průtokového válce by mělo proběhnout plynule, bez přerušení, během 1 a ½ minuty. Po rozlití směsi se okamžitě změří největší rozměr „koláče“ a na něj kolmý rozměr. Získají se tak dvě hodnoty průměru, ze kterých se spočítá průměr. U tekutých zálivek, kterými má být dosaženo snadného vyplnění prostoru, se uvažuje průměr rozlití od 200 mm do 300 mm. V rámci výzkumných prací disertační práce byla tato zkouška použita pouze v některých případech a především pro prvotní ověřování reologických vlastností směsí. Vzhledem ke zjištění dalších parametrů směsi a jejího reálného chování při aplikaci, bylo ovšem nutné použití většího množství směsi (nad 663 ml), proto se zkouška rozlití primárně prováděla podle normy ČSN EN 12350-8.



Obr. 27: Aparatura pro měření rozlití (ASTM D 6103-96) [85]

3.2.2 Stanovení objemové hmotnosti v čerstvém stavu

Určení objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek v čerstvém stavu bylo provedeno podle normy ČSN EN 12350-6 [86] určené pro beton. Objemová hmotnost samozhutnitelných zálivek v čerstvém stavu byla vypočtena podle následujícího vzorce (8).

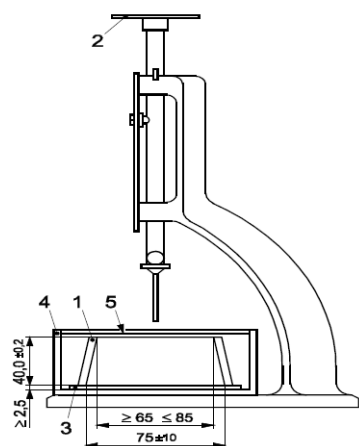
$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (8)$$

kde D ... objemová hmotnost čerstvé samozhutnitelné zálivky [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 m_1 ... hmotnost prázdné nádoby [kg],
 m_2 ... hmotnost naplněné nádoby se samozhutnitelnou zálivkou [kg],
 V ... objem nádoby [m^3].

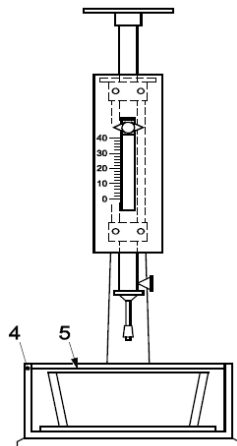
3.2.3 Stanovení dob tuhnutí

Na základě evropských standardů byla zkouška dob tuhnutí provedena podle ČSN EN 196-3 [87]. Podstatou zkoušky stanovení tuhnutí je sledování vnikání jehly do cementové kaše normální konzistence, až je dosaženo určité předepsané hodnoty (Obr. 28 až Obr. 30).

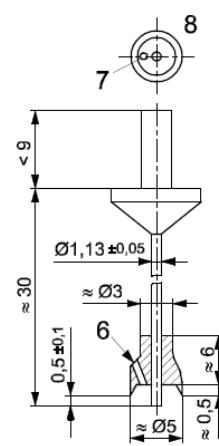
Vzhledem k povaze materiálu, kterým jsou samozhutnitelné zálivky na bázi zemin, bylo při provádění zkoušek dob tuhnutí nutné provést drobné úpravy. První úprava zkoušky souvisela s tím, že některé samozhutnitelné zálivky dosahovaly i po jednom dni tak malých pevností, že se Vicatova jehla (pro stanovení počátku tuhnutí) zabořovala i do zatvrdlých vzorků. Po výpočtu bylo zjištěno, že tento problém byl způsoben tím, že jehla Vicatova přístroje vyvozuje na samozhutnitelnou zálivku příliš velkého tlaku (až 3 MPa), což byl tlak až 10krát vyšší než požadovaná pevnost samozhutnitelné zálivky. Řešením tedy bylo, pro stanovení počátku tuhnutí, použití jehly, která se používá při stanovení doby tuhnutí. Výměna jehly za plošší snížila vyvinutou sílu na cca 0,15 MPa, což byla síla odpovídající požadovaným pevnostem v tlaku zatvrdlé samozhutnitelné zálivky. Další úprava souvisela s nutností absence vody v nádobě, do které se ukládá naplněný prstenec se směsí, na němž se následně zkouší konec tuhnutí. Důvodem bylo malé množství pojiv (především cementu) ve směsích, díky čemuž některé vzorky netuhly pod vodou ani po několika hodinách. Díky pomalému vývinu tuhnutí byly zároveň upraveny doby mezi jednotlivými vpichy. V některých případech až na dobu 60 minut.



Obr. 28: Boční pohled
s prstencem ve výchozí poloze
pro stanovení počátku tuhnutí
[87]



Obr. 29: Přední pohled
s prstencem v obrácené
poloze pro stanovení konce
tuhnutí [87]



Obr. 30: Jehla s nástavcem
pro stanovení konce tuhnutí
[87]

3.2.4 Stanovení objemové hmotnosti v zatvrdlém stavu

Zkouška stanovení objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek v zatvrdlém stavu byla provedena podle normy ČSN EN 12390-7 [88] určené pro beton. Podstatou zkoušky bylo stanovení objemových hmotností samozhutnitelných zálivek měnících se v čase.

Objemová hmotnost samozhutnitelných zálivek byla stanovena po 7, 14, 28 a 90 dnech zrání, stejně jako při stanovení pevnosti v tlaku. Objemová hmotnost samozhutnitelných zálivek byla vypočtena podle následujícího vzorce (9):

$$D = \frac{m}{V} \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (9)$$

kde D ... objemová hmotnost zkušební tělesa [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

m ... hmotnost zkušební tělesa po určité době zrání [kg],

V ... objem stanovený z měření jmenovitých rozměrů vzorků [mm].

Výsledek objemové hmotnosti se zaokrouhlil na nejbližších $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

3.2.5 Stanovení pevnosti v tlaku

Pevnost v tahu samozhutnitelných zálivek byla provedena dle ČSN EN 12390-3 [89] (viz Obr. 31). Z naměřených hodnot po 7, 14, 28 a 90 dnech zrání byla, podle následujícího vztahu (10), vypočítána výsledná hodnota pevnosti v tlaku zkoušených těles.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad [\text{MPa}] \quad (10)$$

Kde f_c ... pevnost v tlaku [MPa ; $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$],

F ... maximální zatížení při porušení [N],

A_c ... průřezová plocha zkušebního tělesa, na kterou působí zatížení v tlaku, vypočtená ze změřených rozměrů tělesa [mm^2]



Obr. 31: Zkušební lis

3.2.6 Stanovení smrštění

Vzhledem k povaze materiálu, kterým jsou samozhutnitelné zálivky na bázi zemin bylo při stanovení smrštění možné vycházet jak z norem určených pro zeminy, tak z norem určených pro beton či jiné stavební prvky.

Díky tomu, že byly samozhutnitelné zálivky navrhovány na bázi zemin, byla zkouška smrštění stanovena podle normy ČSN 72 1019 [90]. Tato norma určuje způsob laboratorního stanovení smršťování (objemového, délkového) soudržných zemin. Platí pro vyšetřování zemin ke stavebním účelům a vztahuje se na všechny jemnozrnné soudržné zeminy v přirozeném uložení, ztuhlé nebo laboratorně připravené s jednoznačně definovaným počátečním stavem.

Výsledná hodnota délkového smrštění, vztažena k počátečnímu stavu, byla vypočítána pomocí vzorce (11).

$$S_l = \frac{l_i - l}{l} \cdot 100 \quad [\%] \quad (11)$$

kde S_l ... délkové (lineární) smrštění [%],

l ... původní délka zkušebního vzorku [mm],

l_i ... měřená délka zkušebního vzorku [mm].

3.2.7 Stanovení vlhkosti

Stanovení vlhkosti směsí bylo provedeno podle normy ČSN EN ISO 17892-2 [91]. Vlhkost byla stanovena jako poměr hmotnosti vody ve vzorku k hmotnosti pevné fáze podle následujícího vzorce (12):

$$w = \frac{m - m_d}{m_d} \cdot 100 [\%] \quad (12)$$

kde w ... vlhkost [%],
 m ... hmotnost vlhkého vzorku [g],
 m_d ... hmotnost vzorku po určité době zrání [g].

3.2.8 RTG analýza

Rentgenová difrakční analýza (RTG) je založena na difrakci rentgenových paprsků na krystalické mřížce vzorku a byla použita pro stanovení mineralogického složení zemin a vybraných směsí samozhutnitelných zálivek. [92] Při návrhu samozhutnitelných zálivek bylo právě mineralogické složení zemin jednou z důležitých vlastností, na základě které bylo možné orientačně navrhnout optimální množství pojiv (vápna, cementu) a přísad, a to ještě před prováděním samotného laboratorního testování. Na již zhotovených samozhutnitelných zálivkách a po určité době bylo zároveň možné pomocí rentgenové difrakční analýzy zjistit vznik novotvarů, které se mohou podílet např. na vývoji pevnosti, počátku a konce tuhnutí apod. Pro RTG difrakční analýzu byl použit přístroj Panalytical Empyrean (Obr. 32).



Obr. 32: Přístroj Panalytical Empyrean pro stanovení mineralogického složení

3.2.9 DTA analýza

Diferenční termická analýza (DTA) byla provedena jako doplňující zkouška k RTG difrakční analýze pro stanovení mineralogického složení (spolu s RTG difrakční analýzou bylo možné přesně určit typ, zejména jílových minerálů) a pro stanovení množství novotvarů (především Ca(OH)_2 a CaCO_3) podílejících se na vývoji pevnosti, počátku a konce tuhnutí apod. Zkouška byla provedena podle normy ČSN 72 1083 (721083) Termické rozborů keramických surovin [93]. Pro měření byl použit přístroj Mettler Toledo TGA/DSC 1 (Obr. 33).



Obr. 33: Přístroj Mettler Toledo TGA/DSC 1

3.2.10 Mikroskopická analýza

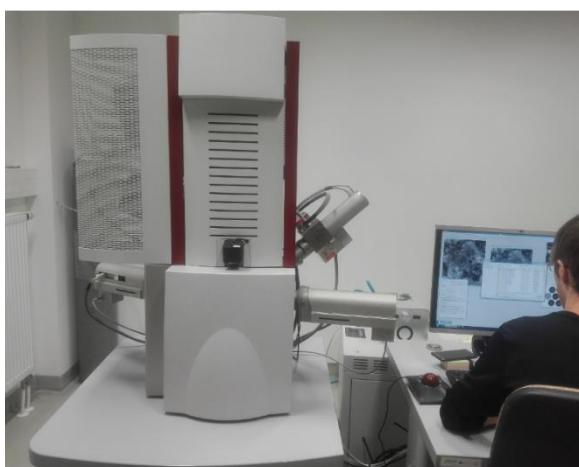
Pro zjištění mikrostruktury samozhutnitelných zálivek byla využita i metoda optické (světelné) mikroskopie. Jednalo se o metodu, která slouží pro zobrazení a hlavně zvětšení (přiblížení) širokého spektra barevných i nebarevných minerálů nacházejících se v samozhutnitelných zálivkách. Měřicí zařízení, které bylo pro tuto metodu využito, byl digitální mikroskop VHX-950F (Obr. 34).



Obr. 34: Digitální mikroskop VHX-950F

Digitální mikroskop VHX-950F byl složen z osvětlovací části (zdroj světla, kondenzor, clona), mechanické části (podstavec, stojan a stolek s křížovým posunem) a optické části - objektivů a okulárů (monokulár nebo binokulár) umožňující rozeznat struktury, jež jsou viditelné pouhým okem. Pro zobrazení mikrostruktury bylo možné využít viditelné část spektra o vlnové délce 420 – 760 nm. Světelný mikroskop zároveň umožňoval zvětšení obrazu vzorku až tisíckrát a rozlišit tak detaily až na úrovni 0,2 μm .

Kromě optické mikroskopie byla na vybraných směsích provedena i zkouška rastrovací elektronové mikroskopie. Tato zkouška byla prováděna pomocí přístroje Tescan Mira3 XMU (viz Obr. 35).



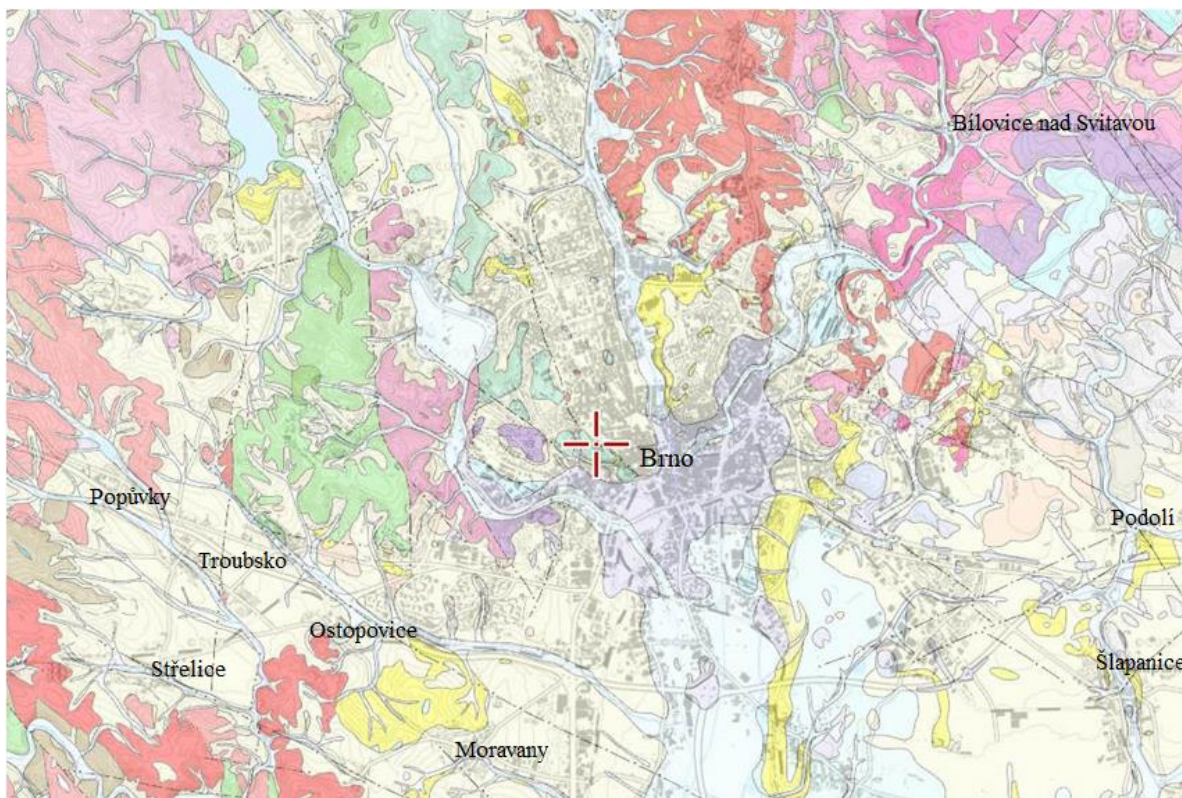
Obr. 35: Rastrovací elektronový mikroskop Tescan Mira3 XMU

4 VÝSLEDKY, VYHODNOCENÍ A JEJICH DISKUZE

4.1 Etapa I - Charakteristika vstupních surovin a návrh na úpravu zemin

Předmětem této etapy bylo zkoumání a ověření vlastností zemin z vytipovaných lokalit a dalších druhů materiálů vhodných pro návrh samozhutnitelných zálivek. Zejména se jednalo o určení hlavních geologických parametrů zemin, na základě nichž bylo možné určit, zda lze zeminu zpětně použít v konstrukci ve stavu, v jakém byla vyhloubena, či je nutná její další úprava.

Vzhledem k charakteru zemin a lokaci byla pro experimentální činnost vybrána oblast Brna a jeho okolí. Jedná se totiž o lokalitu, ve které se vyskytují téměř všechny druhy zemin od vápenců, jílu, přes spraše, až po písky (Obr. 36). Geologicky nejstarší sedimenty charakteru zemin představují na území města Brna miocenní bazální písky a mořské vápenité jíly, v jejichž nadloží se nachází kvartérní fluvialní a deluviální akumulace proměnlivé zrnitosti a sedimenty eolického původu reprezentované vrstvami spraší. Nejmladšími geomateriály jsou v prostoru městské zástavby hojně zastoupené sedimenty antropogenního původu.



Legenda:

navážka, halda, výsypka, odval	jílovité břidlice, prachovce, droby	migmatizovaná biotitická pararula až migmatit, místy s amfibolem
nivní sediment	droby	metabazalt, zelená břidlice
smíšený sediment	kremité břidlice se silicity	aplít, pegmatit
slatina, rašelina, hnílokal	hlíznaté vápence	granitový porfyr
písčito-hlinitý až hlinito-písčitý sediment	vápence, brekcie	granodioritový, dioritový porfyr
kamenitý až hlinito-kamenitý sediment	vápence	žilný křemen
spraš a sprašová hlína	vápence	šterky, písčité šterky
sediment deluvioeolický	vápence a dolomity	šterk, písčitý šterk
písek, šterk	vápence	vápenec
písek, šterk	arkózy, slepenec	vápnitý jíl (tégel), místy s polohami písků
písek, šterk	kataklazovaný leukokrání až biotitický granit, aplitický granit	klastika - písky, šterky se zpevněnými polohami pískovce, slepenec
písek, šterk	amfibol biotitický granodiorit	šterky, šterkovité písky, písky
písek, šterk	šedý, biotitický granodiorit	jíly, prachovité jíly, podřadné písky, vzácně šterky
střídání kaolinických jílu a písků	šedý, načervenalý biotitický granodiorit	křemenné šterky, jemnozrné písky
vápenec	biotitický granodiorit až tonalit	
slepenec až brekcie	biotitický granodiorit	
arkózové pískovce	biotitický až leukokrání granit	
jílovce, prachovce, pískovce	biotitický až amfibol biotitický granodiorit	
pískovce	biotit-amfibolický diorit, křemenný diorit	
jílovité břidlice	ultramafit, serpentinit	
droby	erlan, krystalický vápenec	
slepenec		

Obr. 36: Geologická mapa města Brna

Z dostupných lokalit byly pro experimentální činnost vybrány konkrétní místa pro odběr vzorků. Jednalo se o lokalitu Brno-Černovice (Obr. 37), Brno-ul. Provazníková (Obr. 38) a Brno-Medlánky (Obr. 39).

Obr. 37: Zemina z lokality
Brno – ČernoviceObr. 38: Zemina z lokality
Brno – ul. ProvazníkováObr. 39: Zemina z lokality
Brno – Medlánky

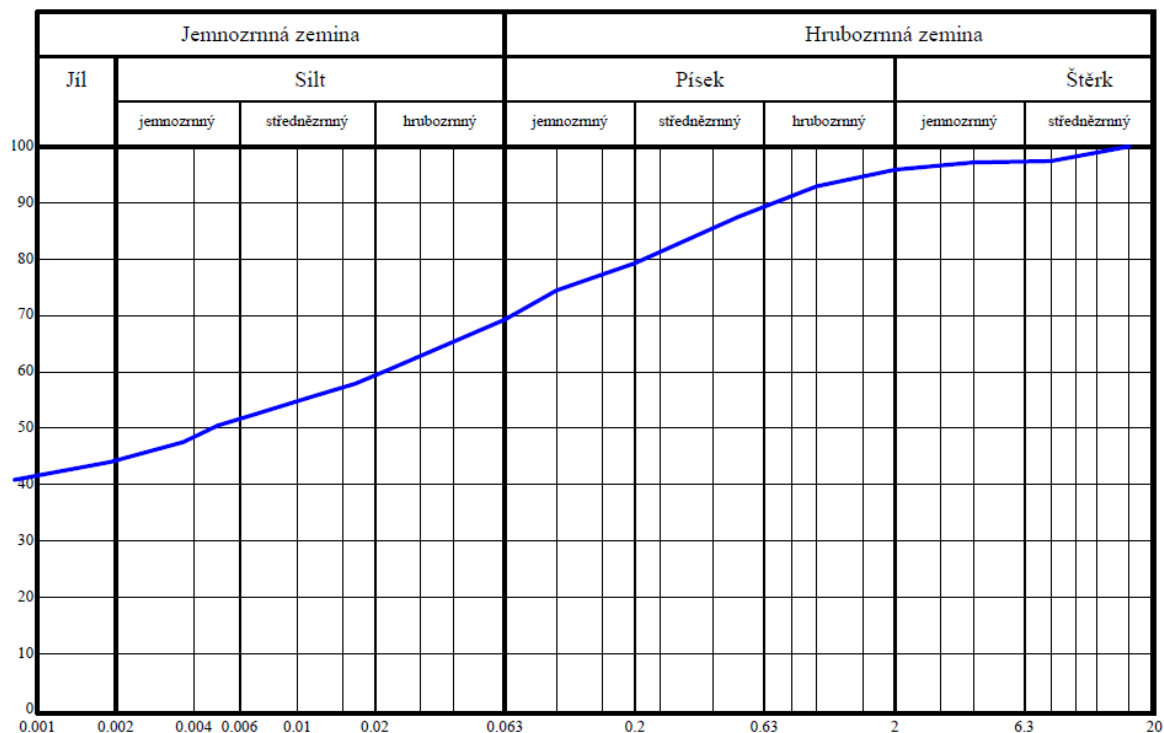
Na základě geologických předpokladů podle mapy města Brna (Obr. 36) bylo ještě před provedením inženýrsko-geologického průzkumu konkrétních lokalit, možné předpokládat, že se na těchto územích bude nejvíce nacházet: navážka, halda, výsypka, odval, nivní sediment, smíšený sediment, písčito-hlinitý až hlinito-písčitý sediment, kamenitý až hlinito-kamenitý

sediment, spraš a sprašová hlína, písek, štěrk, arkózy, slepence, šedý, načervenalý biotitický granodiorit až tonalit, metabazalit, zelené břidlice, a dále vápnité jíly (těgl), místy s polohami písků, jíly, prachovité jíly, podřadně písky a vzácně štěrky. Pro to, aby se určilo, jaké konkrétní typy zemin se na daném území nacházejí, bylo nutné provést odběr vzorků, na kterých byly následně provedeny laboratorní testy.

4.1.1 Charakteristika vybraných typů zemin

Laboratorní testování zemin bylo provedeno na základě platných norem ČSN EN ISO 14688-1 [12], ČSN EN ISO 14688-2 [13], ČSN EN ISO 17892-4 [14], ČSN EN ISO 14689 [15] a ČSN EN 1997-2 [17].

První testovaná zemina byla z lokality **Brno – Medlánky**. Na základě geologických předpokladů se u zeminy odebrané z této lokality předpokládalo, že se bude jednat o hlinito-písčitou zeminu. Z výsledků laboratorního testování vyplynulo, že se jednalo o „písčitý jíl“, který se označuje symbolem saCl. Pro zjednodušení bude dále tato zemina označována jako „saCl“. U zeminy se dále, stanovovalo zastoupení jednotlivých frakcí, na základě síťového rozboru. Výsledkem tohoto testování byla křivka zrnitosti (Obr. 40). Z křivky zrnitosti bylo možné vyčíst zastoupení podílů jemnozrné frakce f (69,53 %) se zrný menšími než 0,063 mm, písčité frakce s (26,41 %) se zrný od 0,063 mm do 2 mm a štěrkovité frakce g (4,06 %) se zrný od 2 mm do 60 mm. Ze zastoupení jednotlivých frakcí vyplynulo, že se jedná o písčitý jíl, který lze označit jako saCl. Na základě podílů jednotlivých frakcí bylo zároveň možné provést zpřesnění názvu zeminy na F6=Cl. Podle tohoto označení se jednalo o jíl se střední plasticitou třídy F6. U písčitého jílu saCl byla zároveň provedena RTG difrakční analýza, která sloužila pro určení mineralogického složení zeminy. Výsledný rentgenogram je uveden v Příloze č. 1. Na základě provedené RTG difrakční analýzy bylo zjištěno, že se v zemině vyskytují převážně následující druhy minerálů: kaolinit, illit, křemen, slídy a kalcit. Dále byla v zemině zaznamenána přítomnost ortoklasu, albitu a montmorillonitu.



Obr. 40. Křivka zrnitosti zeminy z lokality Brno – Medlánky

Dalšími parametry, které se u této zeminy stanovily, byla mez tekutosti w_L , mez plasticity w_p , index plasticity I_p , vlhkost zeminy w , stupeň konzistence I_c , číslo nestejnozrnitosti C_u , číslo křivosti C_c a propustnost zeminy. Na základě těchto parametrů, uvedených v Tab. 15, bylo možné zeminu dále popsat a určit její vlastnosti.

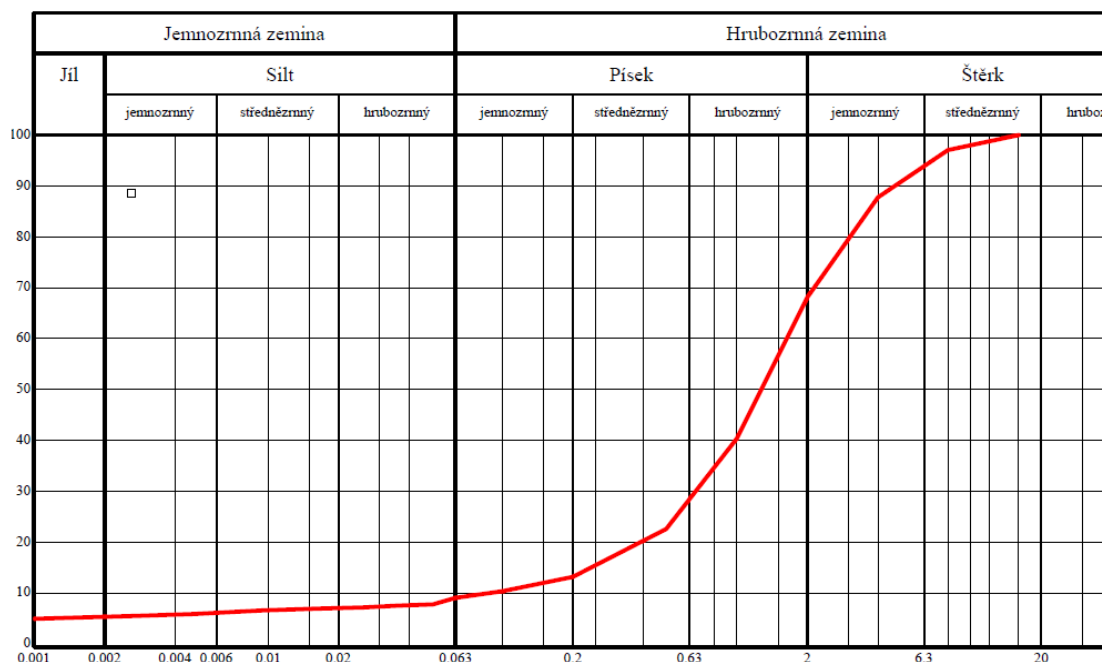
Tab. 15: Výsledky laboratorních zkoušek zeminy F6 Cl = saCl

Název	Symbol	Písčité jíl
		saCl
Podíl frakcí [%]	f (0-0,063 mm)	69,53
	s (0,063-2,0 mm)	26,41
	g (2,0-63 mm)	4,06
Průměry	d_{10}	0,0008
	d_{30}	0,0008
	d_{60}	0,0206
Mez tekutosti	w_L [%]	38,00
Mez plasticity	w_p [%]	21,60
Číslo plasticity	I_p [%]	16,40
Vlhkost zeminy	w [%]	19,70
Stupeň konzistence	I_c [-]	1,12
Číslo nestejnozrnitosti	C_u [-]	25,302
Číslo křivosti	C_c [-]	0,040
Propustnost z křivky zrnitosti	k [$m \cdot s^{-1}$]	$2,064 \cdot 10^{-9}$

Z výsledků křivky zrnitosti bylo zjištěno, že zemina obsahuje více jak 15 % jemnozrnné frakce f (69,53 %). Na základě normových požadavků byla tedy u zeminy stanovena i mez tekutosti, mez plasticity, číslo plasticity a stupeň konzistence. Z těchto hodnot bylo možné určit, zda se jedná o zeminu s nízkou (L), střední (I), vysokou (H), velmi vysokou (V) a extrémně vysokou plasticitou (E). V tomto případě se jednalo o zeminu se střední plasticitou (I). Dalším sledovaným parametrem byla vlhkost zeminy, která měla hodnotu 19,70 %. Nižší hodnota vlhkosti, ve srovnání s ostatními zeminami, byla ovlivněna přítomností menšího množství jemnozrnných částic v zemině. Pro zachování vlhkosti a dalších vlastností byla proto zemina uchována v neprodyšných nádobách. Podle čísla nestejnozrnitosti C_u ($C_u > 15$) bylo určeno, že se jedná o nestejnozrnnou zeminu. Z čísla křivosti C_c ($C_c < 1$) bylo možné stanovit, že se jednalo o zeminu špatně zrněná a neměla tedy plynulou křivku zrnitosti (v zemině je převážně zastoupena jemnozrnná a písčítá frakce). Hodnota propustnosti k predikovala, že se jednalo o nepropustnou zeminu. Na základě provedené RTG difrakční analýzy bylo zároveň zjištěno, že zemina obsahuje převážně jílové minerály. Z křivky zrnitosti a na základě výsledků laboratorního testování zároveň vyplynulo, že patřila zemina podle Scheibleho kritéria namrzavosti do oblasti nebezpečně namrzavé.

Druhá testovaná zemina byla z **lokality Brno-Černovice**. Na základě geologických předpokladů se u této zeminy předpokládalo, že se bude jednat o písčitou zeminu. Z výsledků laboratorního testování vyplynulo, že se jednalo o „mírně jílovitý jemnozrnný šterkovitý hrubozrnný písek“, který se označuje symbolem fgrCSa. Pro zjednodušení bude dále tato zemina označována jako „fgrCSa, či písčítá zemina“. U písčité zeminy se dále stanovovalo zastoupení jednotlivých frakcí, na základě síťového rozboru. Výsledkem tohoto testování byla křivka zrnitosti (Obr. 41). Z křivky zrnitosti bylo možné vyčíst zastoupení podílů jemnozrnné frakce f (9,55 %) se zrna menšími než 0,063 mm, písčité frakce s (58,70 %) se zrna od 0,063 mm do 2 mm a šterkovití frakce g (31,74 %) se zrna od 2 mm do 60 mm. Zastoupení jednotlivých frakcí nám potvrdilo, že se jednalo o písčitou zeminu, kterou bylo možné označit jako fgrCSa. Na základě podílů jednotlivých frakcí bylo zároveň možné provést zpřesnění názvu zeminy na S3=S-F. Podle tohoto označení se jednalo o písek s příměsí jemnozrnné zeminy třídy S3. U písčité zeminy fgrCSa, stejně jako tomu bylo u písčitého jílu saCl, byla zároveň provedena RTG difrakční analýza, která sloužila pro určení mineralogického složení zeminy. Výsledný rentgenogram je uveden v Příloze č. 2. Na základě provedené RTG difrakční analýzy bylo zjištěno, že se v zemině vyskytují převážně

následující druhy minerálů: křemen, kalcit, kaolinit, slídy a illit. Dále byl v zemině zaznamenán ortoklas, albit a montmorillonit.



Obr. 41. Křivka zrnitosti zeminy z lokality Brno-Černovice

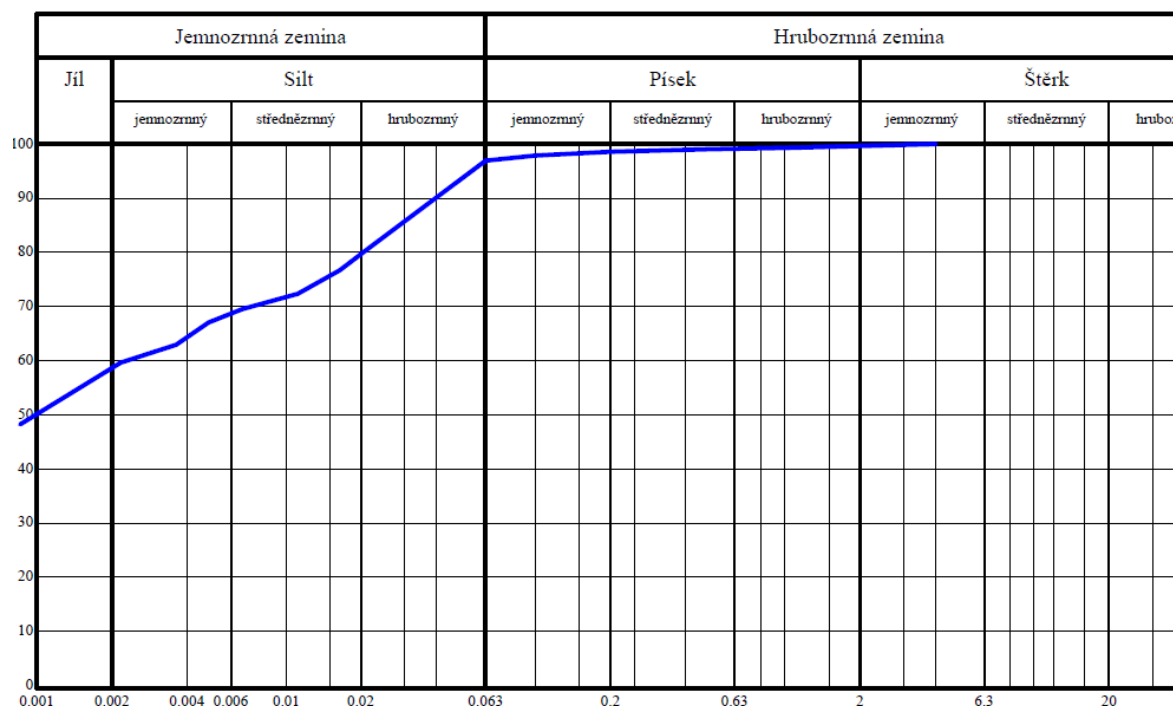
Dalšími parametry, které se u zeminy stanovily, byla mez tekutosti w_L , mez plasticity w_p , index plasticity I_p , vlhkost zeminy w , stupeň konzistence I_c , číslo nestejnozrnatosti C_u , číslo křivosti C_c a propustnost zeminy. Na základě těchto parametrů, uvedených v Tab. 16, bylo možné zeminu dále popsat a určit její vlastnosti.

Tab. 16: Výsledky laboratorních zkoušek zeminy S3 S-F = fgrCSa

Název	Symbol	Mírně jílovitý jemnozrnný štěrkovitý hrubozrnný písek
		fgrCSa
Podíl frakcí [%]	f (0-0,063 mm)	9,55
	s (0,063-2,0 mm)	58,70
	g (2,0-63 mm)	31,74
Průměry	d_{10}	0,0741
	d_{30}	0,6579
	d_{60}	1,6254
Mez tekutosti	w_L [%]	-
Mez plasticity	w_p [%]	-
Číslo plasticity	I_p [%]	0,0
Vlhkost zeminy	w [%]	4,2
Stupeň konzistence	I_c [-]	0,0
Číslo nestejnozrnatosti	C_u [-]	21,92
Číslo křivosti	C_c [-]	3,59
Propustnost z křivky zrnitosti	k [$m \cdot s^{-1}$]	$1,599 \cdot 10^{-4}$

Z výsledků křivky zrnitosti bylo zjištěno, že zemina obsahuje méně jak 15 % jemnozrnné frakce f (9,55 %). Na základě normových požadavků nebylo tedy potřeba provádět stanovení meze tekutosti, meze plasticity, čísla plasticity a stupeň konzistence, proto nejsou tyto parametry v Tab. 16. uvedeny. Z dalších parametrů bylo možné určit, že má zemina poměrně malou vlhkost w (4,2 %). Pro zachování vlhkosti a dalších vlastností byla zemina uchována v neprodyšných nádobách. Podle čísla nestejnozrnitosti C_u ($C_u > 15$) bylo určeno, že se jedná o nestejnozrnnou zeminu. Z čísla křivosti C_c bylo možné stanovit, že se jednalo o zeminu dobře zrněnou a měla tedy poměrně plynulou křivku zrnitosti (se zastoupením převážně písčité frakce). Hodnota propustnosti k predikovala, že se jednalo o propustnou zeminu. Na základě provedené RTG difrakční analýzy bylo zároveň zjištěno, že zemina obsahuje převážně křemičité složky, což se dalo předpokládat již z křivky zrnitosti. Z křivky zrnitosti a na základě výsledků laboratorního testování zároveň vyplynulo, že patřila zemina podle Scheibleho kritéria namrzavosti do oblasti nenamrzavé.

Třetí testovaná zemina byla z lokality **Brno – ul. Provazníková**. Na základě geologických předpokladů se u zeminy odebrané z této lokality předpokládalo, že se bude jednat o jílovitou zeminu. Z výsledků laboratorního testování vyplynulo, že se jedná o „jíl“, který se označuje symbolem Cl. Pro zjednodušení bude dále tato zemina označována jako „Cl“. U zeminy se dále, stejně jako tomu bylo v předchozím případě, stanovovalo zastoupení jednotlivých frakcí, na základě síťového rozboru. Výsledkem tohoto testování byla křivka zrnitosti (Obr. 42). Z křivky zrnitosti bylo možné vyčíst zastoupení podílů jemnozrnné frakce f (96,99 %) se zrna menšími než 0,063 mm, písčité frakce s (2,68 %) se zrna od 0,063 mm do 2 mm a šterkovití frakce g (0,33 %) se zrna od 2 mm do 60 mm. Ze zastoupení jednotlivých frakcí se nám potvrdilo, že se jednalo o jílovitou zeminu, kterou bylo možné označit jako Cl. Na základě podílů jednotlivých frakcí bylo zároveň možné provést zpřesnění názvu zeminy na F7=MH. Podle tohoto označení se jednalo o hlinu s vysokou plasticitou třídy F7. U jílu Cl, stejně jako u předchozích dvou zemin saCl a fgrCSa, byla zároveň provedena RTG difrakční analýza, která sloužila pro určení mineralogického složení jílu. Výsledný rentgenogram je uveden v Příloze č. 3. Na základě provedené RTG difrakční analýzy bylo zjištěno, že se v zemině vyskytují převážně následující druhy minerálů: kaolinit, illit, slídy, křemen, kalcit a montmorillonit. Dále byl v zemině zaznamenán ortoklas a albit.



Obr. 42. Křivka zrnitosti zeminy z lokality Brno – ul. Provazníková

Dalšími parametry, které se u zeminy stanovily, byla mez tekutosti w_L , mez plasticity w_p , index plasticity I_p , vlhkost zeminy w , stupeň konzistence I_c , číslo nestejnozrnatosti C_u , číslo křivosti C_c a propustnost zeminy. Na základě těchto parametrů, uvedených v Tab. 17, bylo možné zeminu dále popsat a určit její vlastnosti.

Tab. 17: Výsledky laboratorních zkoušek zeminy F7 MH = CI

Název	Symbol	Jíl
		CI
Podíl frakcí [%]	f (0-0,063 mm)	96,99
	s (0,063-2,0 mm)	2,68
	g (2,0-63 mm)	0,33
Průměry	d_{10}	0,0009
	d_{30}	0,0009
	d_{60}	0,0022
Mez tekutosti	w_L [%]	54,00
Mez plasticity	w_p [%]	29,90
Číslo plasticity	I_p [%]	24,10
Vlhkost zeminy	w [%]	25,40
Stupeň konzistence	I_c [-]	1,19
Číslo nestejnozrnatosti	C_u [-]	2,569
Číslo křivosti	C_c [-]	0,389
Propustnost z křivky zrnitosti	k [$m \cdot s^{-1}$]	$9,320 \cdot 10^{-11}$

Z výsledků křivky zrnitosti bylo zjištěno, že zemina obsahuje více jak 15 % jemnozrnné frakce f (96,99 %). Na základě normových požadavků byla tedy u zeminy stanovena i mez tekutosti, mez plasticity, číslo plasticity a stupeň konzistence. Z těchto hodnot bylo možné určit, zda se jednalo o zeminu s nízkou (L), střední (I), vysokou (H), velmi vysokou (V) a extrémně vysokou plasticitou (E). V tomto případě se jednalo o zeminu s vysokou plasticitou (H). Dalším sledovaným parametrem byla vlhkost zeminy, která měla hodnotu 25,40 %. Vyšší hodnota vlhkosti, ve srovnání s předchozí zeminou, byla ovlivněna přítomností vyššího množství jemnozrnných částic v zemině. Pro zachování vlhkosti a dalších vlastností byla proto zemina uchována v neprodyšných nádobách. Podle čísla nestejnozrnatosti C_u ($C_u < 5$) bylo určeno, že se jednalo o stejnozrnnou zeminu. Z čísla křivosti C_c ($C_c = 1$ až 3) bylo možné stanovit, že se jednalo o zeminu dobře zrněnou a měla tedy poměrně plynulou křivku zrnitosti (se zastoupením převážně jemnozrnné frakce). Hodnota propustnosti k predikovala, že se jednalo o velmi nepropustnou zeminu. Na základě provedené RTG difrakční analýzy bylo zároveň zjištěno, že zemina obsahuje převážně jílovité minerály, které jsou v zemině, podle křivky zrnitosti, zastopeny ve více jak 90 %. Z křivky zrnitosti a na základě výsledků laboratorního testování zároveň vyplynulo, že patřila zemina podle Scheibleho kritéria namrzavosti do oblasti vysoce namrzavé.

4.1.2 Návrh na úpravu zemin

Na základě provedeného geologického testování zemin byla zjištěna spousta parametrů, díky kterým bylo možné navrhnout, zda by zemina ve stavu, v jakém byla vyhloubena, mohla být zpětně použita v konstrukci, nebo je nutná její další úprava. Zpětné použití zemin je v následujícím textu hodnoceno s ohledem na jejich použití jakožto zasypy IS (nejčastěji ve zhutněné formě), ovšem ne v podobě samozhutnitelné zálivky. U té je totiž úprava zeminy jednoznačně nutná. Dále uvedené návrhy na úpravu zemin, avšak úzce souvisí s tím, zda a za jakých podmínek by bylo možné zeminu použít ve formě samozhutnitelné zálivky.

S ohledem na normové požadavky ČSN 73 6133 [16], ČSN EN 1997-2 [17], TKP 30 [18], TP 170 [29] a především pak TP 94 [20] bylo nejprve hodnocení parametrů zemin zaměřeno na jejich předúpravu. Předúprava zemin se týkala především těch, které se podle ČSN 73 6133 [16] nesmí použít do zemního tělesa. Dle normy se jedná o organické zeminy, bahna, rašelinu, humus, ornice atd. Problémem těchto zemin je především to, že obsahují nevhodné frakce, organické látky v množství větším než 6 % či jsou extrémně plastické. Dalším problémem může být zároveň to, že jsou kontaminovány (jiným stavebním odpadem, odpadky kolemjdoucích apod.), promáčeny deštěm apod. Tyto parametry je možné většinou

hodnotit vizuálně, a to přímo na staveništi, aniž by se na zeminách musely provádět laboratorní testy. Hodnocení těchto parametrů bylo proto u vytipovaných zemin (z lokalit Brno-Černovice, Brno-ul. Provazníkova a Brno-Medlánky) provedeno „in situ“ hned po jejich odběru. Z výsledků hodnocení zemin vyplynulo, že neobsahují nevhodné frakce, organické látky v množství více jak 6 %, nejsou nijak kontaminovány či promáčeny a není tedy nutná jejich předúprava.

Na základě těchto parametrů by se dalo říci, že je zeminu možné zpětně použít v konstrukci bez jakékoliv úpravy. To ovšem nelze jednoznačně konstatovat, aniž by na zeminách bylo provedeno laboratorní testování a určení jejich vlastností, díky kterým lze zjistit, zda a jak je nutné zeminu upravit.

Z tohoto důvodu byly z vytipovaných lokalit odebrány vzorky zemin, na kterých se provádělo laboratorní testování. Na základě zjištěných poznatků, které byly porovnány s normovými požadavky, mohlo být konstatováno, že zeminy nebylo možné použít v takové stavu, v jakém byly vyhloubeny. A to především z toho důvodu, že již podle zařazení (S-F, MH, Cl) dle normy ČSN 73 6133 [16] patří tyto zeminy do kategorie „nevhodných“ zemin, které nejsou určeny k přímému použití bez úpravy. Zemina S-F by teoreticky, pouze na základě tohoto parametru, mohla být podmíněčně vhodná k přímému použití bez úpravy ovšem za předpokladu splnění i dalších parametrů, kterým je např. vlhkost, mez tekutosti, mez plasticity, index plasticity, mrazuvzdornost atd., které nesplňovala.

Vlhkost zeminy se má podle TP 94 [20] pohybovat v intervalu vlhkosti, kdy je možno tuto zeminu zhutnit na požadovanou míru zhutnění. Obecně pak platí zásada, že se vlhkost upravené zeminy bezprostředně před hutněním nemá lišit od vlhkosti optimální (určené Proctorovou standardní zkouškou) o více než jsou meze vlhkostí odpovídající požadované míře zhutnění. Vzhledem ke zvýšené vlhkosti, a především pak díky obsahu jemných podílů, u zemin odebraných z lokalit Černovice, ul. Provazníkova a Medlánky by tento předpoklad na míru zhutnění nebyl splněn. Tyto zeminy, hlavně z lokality ul. Provazníkova a Medlánky, by díky vyššímu obsahu jílovitých částic (ul. Provazníkova – $f = 96,99 \%$, Medlánky, $f = 69,53 \%$) nebylo možné zhutnit na požadovanou míru zhutnění.

Pro mechanickou úpravu těchto zemin by bylo možné použít příměs jiných zemin nebo materiálů (např. popílků) vhodné zrnitosti a vlhkosti. Tím by se dosáhlo především zlepšení vlhkosti a dále úpravy křivky zrnitosti.

Zrnitost zemin je z hlediska požadovaných parametrů jednou z klíčových vlastností. Především pak zastoupení jemnozrnné frakce f (se zrny menšími než 0,063 mm), písčité frakce s (se zrny od 0,063 mm do 2 mm) a šterkovité frakce g (se zrny od 2 mm do 63 mm). Procentuální zastoupení jednotlivých složek v zemině má totiž zásadní vliv na její mechanické vlastnosti. Na základě výsledků granulometrického složení zemin z lokality Černovice, ul. Provazníkova a Medlánky bylo zjištěno, že tyto zeminy nemají pro jejich zpětné použití v konstrukci zcela optimální granulometrické křivky a z toho plynoucí čísla nestejnozrnitosti a mrazuvzdornost. Zhoršené parametry čísla nestejnozrnitosti a mrazuvzdornosti byly dány především zastoupením vyššího množství jemnozrnných částí v zeminách. Z tohoto pohledu je vyžadována úprava těchto zemin.

Vzhledem k povaze zemin (především složení, obsahu vlhkosti, jemných částic a namrzavosti), které byly odebrány z vytipovaných lokalit, a na základě normových požadavků, byla jako vhodná úprava těchto zemin navržena stabilizace. Tento způsob úpravy zemin byl zvolen díky tomu, že při vhodně zvoleném druhu a množství stabilizačních činidel (vápna, cementu) lze dosáhnout zlepšení zpracovatelnosti, zhutnitelnosti, poměru únosnosti (CBR), namrzavosti, vlhkosti a dalších vlastností zemin. Zároveň jsou stabilizační přísady, jedny z materiálů, které jsou ochotny reagovat se zeminami a je možné je proto využít při návrhu receptur samozhutnitelných zálivek. Sledování vlivu konkrétních druhů a množství stabilizačních činidel s jednotlivými typy zemin bylo předmětem výzkumných prací II Etapy.

Jako další návrh na způsob úpravy zemin, kromě stabilizace, bylo jejich ztekucení. V tomto případě se jedná o zcela novou technologii úpravy zemin, která doposud není v nynější praxi zcela známa a v zahraničí je používána pouze výjimečně či jako tzv. „know how“. Jedním z hlavních cílů této disertační práce proto bylo se ztekucením zemin zabývat. Výzkumem použití přísad, které mohou zlepšovat jak reologické vlastnosti směsi, tak vývoj pevnosti v čase byla věnována III Etapa této disertační práce.

Z výše zmíněných poznatků o stabilizaci a ztekucení zemin bylo nutné pro návrh samozhutnitelných zálivek provést výběr dalších surovin, které by byly vhodné pro úpravu vlastností zemin tak, abychom získali samozhutnitelnou zálivku optimálních parametrů.

4.1.3 Vlastnosti dalších surovin

Při výběru surovin, pro návrh receptur samozhutnitelných zálivek, se vycházelo z normových požadavků, provedených rešerší a doporučení odborníků. Na základě zjištěných informací byly vybrány následující suroviny.

4.1.3.1. Vápno

Vápno patří mezi bezkonkurenční pomocníky při úpravě a stabilizaci zemin. Jako vápno pro stabilizaci uvažujeme hašené nebo nehašené, vápenný hydrát ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), nikdy ne však vápenec, který je pro stabilizaci zemin inertní. Na základě teoretických poznatků a laboratorního testování o vhodnosti použití vápna k danému typu zeminy, bylo pro stabilizaci zemin navrženo vápno nehašené ViaCalco 90 od společnosti Carmeuse. Podle ČSN EN 459-1 [94] bylo toto vápno klasifikované jako CL90-Q. Celkové množství $\text{CaO}+\text{MgO}$ bylo v tomto vápně vyšší jak 90 %. Tento typ vápna se obecně s výhodou používá pro zlepšování vlastností zemin v silničním a pozemním stavitelství. Díky svým specifickým vlastnostem umožňuje tzv. ošetření neboli stabilizaci jemnozrnných jílovitých zemin (v případě disertační práce především saCl a Cl). Výhodou použití tohoto vápna je zároveň snížení vlhkosti zemin. Vápno se doporučuje používat především ve velmi soudržných jílovitých zeminách, kde optimalizuje obsah pojiva a díky vzniku pucolánovým reakcím zeminy stabilizuje.

Určení druhu a množství přidaného vápna k zemině bylo voleno s ohledem na výsledky laboratorního testování geologických vlastností zemin, jež jsou uvedeny v kapitole 4.1.1. S ohledem na tyto parametry, bylo vhodné použití pojiv následovně:

- vápno (3 – 9 %), pokud $I_p > 10$ a obsah jílovitých částic $f > 10$ %,
- cement (3 – 10 %), pokud $I_p \leq 10$ a $f < 20$ %,
- kombinace pojiv, cement (3 – 10 %), pokud $10 < I_p < 20$ a $f < 10$ %.

Na základě výsledků laboratorního testování zemin, především pak indexu plasticity I_p a obsahu jemnozrnné frakce f zemin, bylo zvoleno jako optimální, pro návrh receptur, použití 1,5 % a 3,0 % vápna.

4.1.3.2. Cement

Pro úpravu zemin se používá především portlandský cement, označovaný jako CEM I, portlandské směsné cementy, označované jako CEM II a směsné cementy, označované jako CEM V, s pevnostní třídou 32,5 a 42,5 R. Výběr druhu cementu zpravidla závisí na druhu zeminy, požadované konečné pevnosti a ekonomickém hledisku.

Aby bylo dosaženo co nejlepších výsledků, muselo být množství cementu voleno pečlivě. V tzv. „hladové“ zemině, např. jílu nebo v prachovitých půdách je nutné použít větší množství cementu, aby bylo dosaženo požadované pevnosti, tím ale dojde ke zvětšení smrštění a současně i ceny. Na základě teoretických poznatků se jako optimální jeví použití cementu v maximální hranici 8 % hmotnostních pro zabránění vzniku smršťovacích trhlin. Větší množství

cementu se úspěšně používá tam, kde je potřeba zatížení ještě před úplným dozráním. Nejnižší hranice množství cementu pro použití jako stabilizátoru zemin jsou 2 %. Doporučené množství cementu jako stabilizátoru zemin je 2 – 8 hmotnostních procent.

Na základě teoretických poznatků byl pro zlepšení účinku stabilizace zemin vybrán portlandský směsný cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R ze závodu v Mokré od společnosti Českomoravský cement, a. s. Z výsledků zkoušek provedených podle ČSN EN 196-3 [87] měl cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R průměrnou hodnotu normální konzistence 29,4 %, počátek doby tuhnutí 238 minut a konec tuhnutí 302 minut. Jeho použití bylo vhodné pro stabilizaci zemin především díky tomu, že při jeho použití docházelo ke zvyšování pevností a zároveň díky obsahu určitého množství volného vápna, které mohlo mít za následek stabilizaci jílových minerálů obsažených v zemině.

S ohledem na výsledky laboratorního testování zemin, především pak výsledků indexu plasticity I_p a obsahu jemnozrnné frakce f zemin, bylo jako optimální zvoleno, pro návrh receptur, použití 2 %, 4 %, 6 % a 8 % cementu CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R k celkové hmotnosti zeminy.

4.1.3.3. Voda

Voda při návrhu samozhutnitelných zálivek zastává nezastupitelnou roli. Přítomnost vody ve směsi ovlivňuje především reologické vlastnosti (schopnost tečení směsi) a zároveň se podílí na hydratačních procesech. Použití voda byla odebrána z brněnského vodovodního řadu. Podle požadovaných parametrů uvedených v ČSN EN 1008 [95] voda splňovala všechny požadovaná kritéria pro její použití. Množství použité vody bylo navrhováno vždy s ohledem na dosažení požadovaných parametrů samozhutnitelných zálivek.

4.1.3.4. Plastifikační a ztekucující přísady

Pro snížení množství vody a zlepšení reologických vlastností bylo pro návrh samozhutnitelných zálivek zvoleno použití plastifikačních a ztekucujících přísad. Výběr plastifikačních a ztekucujících přísad byl proveden s ohledem na povahu materiálu, kterým jsou právě samozhutnitelné zálivky na bázi zemin a na základě doporučení výrobců. Vzhledem k tomu, že samozhutnitelné zálivky patří mezi tzv. „hybridní materiál“, který nelze posuzovat ani jako beton, ani jako zhutněnou zeminu či jinou cementovou zálivku, byl výběr vhodných přísad (plastifikačních, ztekucujících) proveden s ohledem na daný typ zeminy a na základě doporučení od výrobců. Pro návrh receptur samozhutnitelných zálivek na bázi písčitých zemin, které se více podobají svým složení betonu, byly proto vybrány plastifikační přísady využívající se v oboru zpracování betonu (na bázi polykarboxylátů)

a pro samozhutnitelné zálivky na bázi jílovitých zemin, jež se podobají složením keramických břeček, byly vybrány ztekucující přísady (na bázi výměny kationtů) používající se v keramickém průmyslu. U plastifikačních přísad se očekává, že budou ochotněji reagovat s cementem, obsaženým v samozhutnitelné zálivce, kdežto u ztekucujících přísad se předpokládá, že budou ochotně reagovat spolu s jílovitými minerály (jemnozrnnými částicemi *f*). Konkrétními vybranými druhy plastifikačních přísad byly: Sika ViscoCrete – 1062, Sika ViscoCrete – 21 a Sika ViscoCrete – 4088 a ztekucujících přísad: uhličitán sodný, hexametafosfát sodný a tripolyfosfát sodný.

Plastifikační přísady

Sika ViscoCrete – 1062 je vysoce účinný superplastifikátor. Z chemického hlediska se jedná o vodný roztok modifikovaných polykarboxylátů. Jeho výhody jsou především ve zlepšení dispergace a smáčení zrn cementu, snížení třecích sil mezi zrny cementu a kamenivem, snížení množství záměsové vody a prodloužení doby zpracovatelnosti při stejném vodním součiniteli. Použití Sika ViscoCrete – 1062 vede ke zvýšení počátečních i konečných pevností, zvýšení trvanlivosti, snížení smrštění a dotvarování a zlepšení vzhledu povrchu betonu. Doporučené dávkování se uvádí od 0,2 % do 2,0 % (z hmotnosti cementu).

Sika ViscoCrete – 21 je dalším druhem vysoce účinného superplastifikátoru s prodlouženou zpracovatelností, který je určen převážně pro prefabrikovanou výrobu a transportbeton. Tato přísada je vhodná pro silou redukci vody, zlepšení tekutosti a doby zpracovatelnosti (do 60 minut). Z chemického hlediska se jedná o vodný roztok modifikovaných polykarboxylátů. Doporučené dávkování se udává pro střední hodnoty konzistence od 0,2 % do 0,8 % (z hmotnosti cementu). Pro dosažení vyšších hodnot konzistence, velmi nízkého vodního součinitele a pro samozhutnitelné betony se doporučuje dávkování v množství od 0,7 % do 1,5 % (z hmotnosti cementu).

Sika ViscoCrete – 4088 je univerzální a vysoce účinný superplastifikátor. Použití Sika ViscoCrete – 4088 vede ke zlepšení dispergace a smáčení zrn cementu, snížení třecí síly mezi zrny cementu a kamenivem, snížení spotřeby záměsové vody a prodloužení doby zpracovatelnosti. Z chemického hlediska se jedná o vodný roztok modifikovaných polykarboxylátů. Doporučené dávkování se udává pro střední hodnoty konzistence od 0,3 % do 0,7 % (z hmotnosti cementu). Pro dosažení vyšších hodnot konzistence, velmi nízkého vodního součinitele a pro samozhutnitelné betony se doporučuje dávkování v množství od 0,6 % do 1,4 % (z hmotnosti cementu).

S ohledem na vlastnosti plastifikačních přísad a doporučení od výrobce bylo pro návrh samozhutnitelných zálivek použito množství 1 %, 2 % a 3 % plastifikační přísady z hmotnosti cementu. Účinek výše uvedených plastifikačních přísad byl ověřován se všemi třemi typy zemin (písčitém jílem „saCl“, mírně jílovitým jemnozrnným šterkovitým hrubozrnným pískem „fgrCSa“ a jílem „Cl“).

Ztekucující přísady

Uhličitan sodný (bezvodá soda) Na_2CO_3 je anorganická sloučenina. Jedná se o sůl kyseliny uhličitě. V bezvodém stavu se jedná o bílý prášek, který je snadno rozpustitelný ve vodě za vývinu hydratačního tepla. Je bez zápachu a jeho hodnota pH je 11,6. S výhodou se tento materiál používá v keramickém průmyslu jako ztekucující přísada licích břeček.

Hexametafosfát sodný, neboli, zkráceně HMFS je tzv. Grahamova sůl, což je polyfosforečnan sodný $\text{Na}(\text{PO}_3)_n$. Jedná se o jemný, bílý, volně tekoucí prášek bez zápachu se sypanou hmotností $1100 - 1500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, rozpustností ve vodě okolo $1000 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ (pomalu rozpustný) a pH 5 - 7. V keramickém průmyslu se hexametafosfát sodný používá jako účinné ztelkucovadlo.

Tripolyfosfát sodný $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ představuje lehce hygroskopické drobné granule, bezbarvé a ve vodě rozpustné. Jeho vlastnosti se nacházejí mezi pyrofosforečnanem sodným a polymetafosforečnanem sodným (resp. hexametafosforečnanem sodným). Tripolyfosfát sodný je stálejší než vyšší fosforečnany (metafosforečnany), ale méně stálý než pyrofosforečnan sodný. pH 1% roztoku vodného při 25 °C je 9,7 - 9,8. V keramickém průmyslu se tripolyfosfát sodný používá jako účinné ztelkucovadlo.

Pro zjištění optimálního množství a druhu ztekucující přísady k danému typu zeminy bylo navrženo provedení laboratorního testování. Vzhledem k povaze zemin bylo testování zaměřeno pouze na písčité jíl „saCl“, a jíl „Cl“. U těchto zemin se, na rozdíl od mírně jílovitého jemnozrnného šterkovitého hrubozrnného písku „fgrCSa“, předpokládá účinek ztekucující přísady, která bude ochotně reagovat spolu s jílovitými minerály (jemnozrnnými částicemi *f*), které jsou v zeminách obsaženy ve více jak 65 % (saCl: *f* = 69,53 %, Cl: *f* = 96,99 %). Pro ověření účinku ztekucujících přísad na konkrétní typ zeminy bude voleno množství ztekucující přísady od 0 % až po 10 % z hmotnosti zeminy.

4.1.3.5. Vedlejší energetické produkty

Kromě výše zmíněných materiálů se dále pro úpravu a stabilizaci zemin mohou použít vedlejší energetické produkty, především klasický a fluidní popílek. Popílky se při úpravě zemin používají díky tomu, že jsou složeny z jemnozrnných částic a mají pucolánové vlastnosti. Při jejich použití tak může docházet ke zlepšení mechanicko-fyzikálních vlastností zemin. Pro úpravu a stabilizaci zemin jsou popílky podle [51] rozdělovány na:

- *PP* – *popel a popílek*, který vzniká při vysokopecním spalování uhlí,
- *FPP* – *fluidní popílek a popel*, jenž vzniká při fluidním spalování mletého uhlí,
- *PSU* – *popílková suspenze*; směs popílku, vody a obvykle i jiného pojiva,
- *PST* – *popílek stabilizovaný*; zvlhčená směs popílku a jiného pojiva (cement, vápno).

Za zásadní výhodu použití popílků při stabilizaci zemin je to, že mohou být využívány jako částečná náhrada primární suroviny (zeminy), čímž může dojít ke snížení nákladů spojených s jejich skládkováním. Zároveň mohou být takto v rámci jedné technologie využity dva druhy materiálů, které jsou z větší části odváženy na skládky. Nutností ovšem, při použití výše zmíněných druhů popílků, je splnění ekologického kritéria, tj. kvalitu výluhu a hmotností aktivitu Ra_{226} , které jsou uvedeny v TP 93 [51].

Obecně lze z výsledků studií Millse [96] Dienharta a kol. [97] konstatovat, že přidání popílků k zeminám, nebo částečné nahrazení cementu popílkem, může vést ke zlepšení technických vlastností zemin, především pak zvýšení pevnosti, trvanlivosti, zlepšení aplikovatelnosti, zpracovatelnosti, odolnosti vůči síranům a alkalickým látkám, snížení smrštění a propustnosti.

Pro zjištění účinku vedlejších energetických produktů při návrhu samozhutnitelných zálivek bylo provedeno pilotní ověření přídatku 5 %, 10 %, 30 % a 60 % (z hmot. zeminy) fluidního popílku (FA) z elektrárny Tisová. Chemické složení fluidního popílku (FA) je uvedeno v Tab. 18.

Tab. 18: Chemické složení fluidního popílku (FA)

Název	Chemické složení [%]								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
FA	28,6	18,0	6,5	7,8	31,1	0,9	0,5	0,3	0,3

4.2 Etapa II - Sledování vlivu stabilizačních činidel při návrhu samozhutnitelných zálivek

Ve druhé etapě bylo provedeno navržení a ověření receptur samozhutnitelných zálivek na bázi zemin a stabilizačních činidel. Návrh receptur byl proveden s ohledem na co největší využití různých typů zemin a k nim vhodných druhů a množství stabilizačních činidel. Za účelem získání detailního popisu reakce mezi jednotlivými komponenty bylo rovněž provedeno laboratorní testování, kterým se ověřily požadované fyzikálně mechanické vlastnosti samozhutnitelných zálivek.

V rámci předchozí Etapy I byl vybrán soubor surovin, vhodných pro návrh samozhutnitelných zálivek. Spolu tyto složky mohou vytvořit směs, která by splňovala určité požadované vlastnosti. Z fyzikálního hlediska je nutné konstatovat, že se jedná o velmi složité prostředí, v němž dochází ke vzájemnému spolupůsobení tří fází – pevné, kapalné a plynné. Vzájemný poměr jednotlivých složek následně ovlivňuje chování směsi jako celku. Při porovnání např. kapalné fáze (vody) a pevné fáze (zeminy) je nutné poznamenat, že voda na rozdíl od zrn zeminy ve směsi přenáší pouze tlak, nikoli smykové napětí. Proto, pokud chceme prozkoumat stav napjatosti ve směsi, pod vlivem vlastního či vnějšího zatížení, je vždy nutné znát vlastnosti složek působících jako celek. Tyto vlastnosti nejčastěji určujeme pomocí laboratorních zkoušek, či zkoušek prováděných přímo in situ.

Na základě Etapy I byl pro experimentální část a návrh receptur samozhutnitelných zálivek Etapy II použit písčité jíl „saCl“, mírně jílovitý jemnozrnný šterkovitý hrubozrnný písek „fgrCSa“ a jíl „Cl“. K jednotlivým typům zemin použito 1,5 % a 3 % nehašeného vápna ze společnosti Carmeuse, portlandský směsný cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R od společnosti Českomoravský cement, a. s. z Mokré v množství 2 %, 4 %, 6 % a 8 % a jejich kombinace.

V rámci výzkumných prací byla u navržených směsí stanovena konzistence podle zkoušky sednutí-rozlítím, objemová hmotnost (v čerstvém a zatvrdlém stavu), pevnost v tlaku (v čerstvém a zatvrdlém stavu) a smrštění. Na vybraných směsích byla následně provedena zkouška počátku a doby tuhnutí, okamžitého indexu únosnosti IBI, mineralogického složení (RTG analýza) a mikroskopická analýza.

4.2.1 Ošetření zemin vápnem a cementem

Pro zjištění vlastností zkoumaných směsí bylo potřeba provést odpovídající zkoušky. Vzhledem k tomu, že se doporučuje pro stabilizaci zemin použití jak nehašeného vápna,

tak vápenného hydrátu, bylo v rámci prvotních pilotních výzkumných prací provedeno ověření účinku hašeného vápna a vápenného hydrátu s vybranými typy zemin. Ověřován byl i účinek nehašeného vápna míchaného se zeminou 24 hodin předem v kombinaci se 4 % cementu CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R. Účinek těchto druhů vápna a cementu byl sledován na základě parametrů konzistence (sednutí-rozlítím) a vývoje pevnosti v tlaku. Konzistence směsi byla zkoušena pomocí Abrams kužele dle ČSN EN 12350-8 [84]. Po stanovení průměru rozliti se směs zařadila do třídy SF1 = 550 – 650 mm, SF2 = 660 – 750 mm a SF3 = 760 – 850 mm. Mísení směsí bylo provedeno stavebním míchadlem. Zkouška pevnosti v tlaku byla provedena dle normy ČSN EN 12390-3 [89]. Pevnost v tlaku byla stanovena na krychlích o velikosti hrany 150 mm. Stanovení pevnosti v tlaku bylo provedeno po sedmi dnech zrání vzorků. Zkoušky se prováděly na vybraných navržených směsích složených z:

- písčitého jílu (JZ, také saCl),
- písčitého jílu (JZ, saCl), 1,5 % nehašeného vápna (JZV),
- písčitého jílu (JZ, saCl), 1,5 % vápenného hydrátu (JZ1,5VH),
- písčitého jílu (JZ, saCl), 3 % vápna (JZ3V),
- písčitého jílu (JZ, saCl), 1,5 % vápna a 4 % cementu (JZVC),
- písčitého jílu (JZ, saCl), 1,5 % vápenného hydrátu a 4 % cementu (JZ1,5VHC),
- písčité zeminy (PZ, také fgrCSa),
- písčité zeminy (PZ, fgrCSa), 4 % cementu (PZC),
- písčité zeminy (PZ, fgrCSa), 1,5 % vápna a 4 % cementu (PZVC).

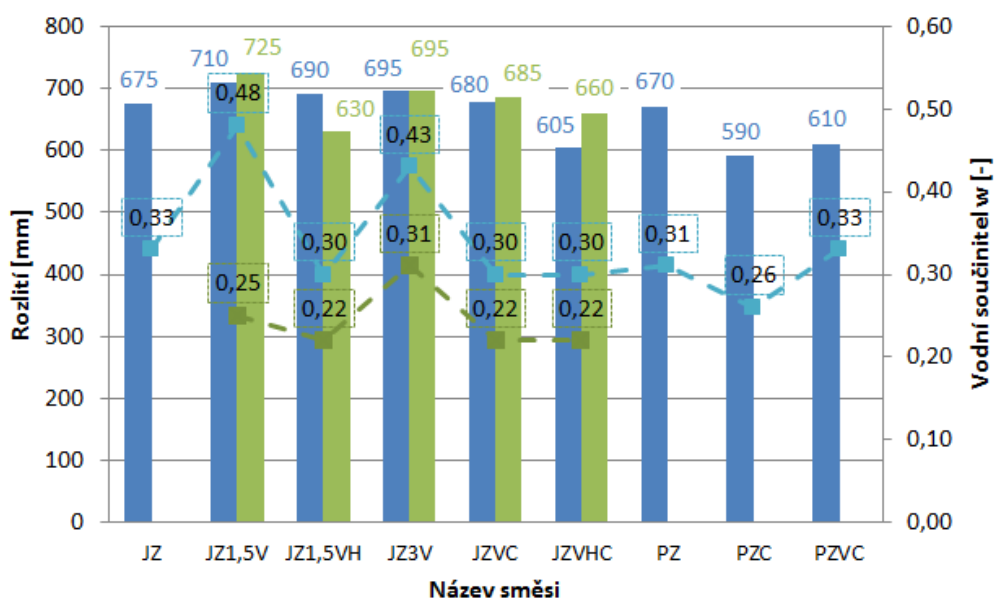
Účinek vlivu nehašeného vápna a vápenného hydrátu s jílem Cl, byl taktéž ověřován. Ovšem již při samotném míchání Cl s nehašeným vápnem docházelo ke shlukování jílovitých částic, které v čerstvém stavu byly poměrně dobře rozmíchatelné s vodou, avšak po 24 hodinách bylo velice obtížné, někdy až nemožné tyto částice rozmíchat (Obr. 43). Stejný efekt se projevoval i při míchání jílu s vápenným hydrátem. Proto se v případě tohoto jílu Cl nedoporučuje jeho ošetření nehašeným vápnem 24 hodin předem. Z těchto důvodů se na tomto jílu Cl nestanovovaly další pilotní zkoušky (konzistence, pevnost v tlaku) a v následujícím textu jsou proto uvedeny pouze výsledky zkoušek provedených na písčitém jílu saCl a písčité zemině fgrCSa.



Obr. 43. Shlukování částic jílu Cl míchaného s nehašeným vápnem

V rámci následujícího textu je pojednáno o sledování vlivu pojiv (hodnocení vlivu 24hodinového působení vápna na strukturu zeminy) na stabilizaci zemin, stanovení množství záměsové vody a jejím vlivu na konzistenci (Obr. 44).

Při hodnocení vlivu účinku nehašeného vápna a vápenného hydrátu na písčité jíl saCl můžeme konstatovat, že již malý přírůstek vápna (1,5 %) měl vliv na změnu vlhkosti především písčitého jílu (JZ, také saCl). Ve srovnání reakce nehašeného vápna s vápenným hydrátem bylo zjištěno, že nehašené vápno okamžitě reagovalo s vlhkostí obsaženou v písčitém jílu a následně přidaným množstvím vody ke směsi. Vápenný hydrát tak okamžitou reakci nevykazoval. Vlivem vlhkosti jsou obecně zeminy těžko zpracovatelné pro hutnění, přidávkou vápna se tyto vlastnosti, především písčitého jílu saCl, ovšem zlepšily.



Obr. 44. Rozliti směsí dle ČSN EN 12350-8 (modře je označena zemina míchaná ihned s vápnem, zeleně je označena zemina míchaná 24 h předem s vápnem)

Z hlediska hodnocení 24 hodinového působení vápna na strukturu písčitého jílu saCl bylo zjištěno, že došlo k výraznému snížení vody potřebné pro zpracování směsi. Míchání zeminy s nehašeným vápnem a vápenným hydrátem 24 h předem mělo pozitivní vliv na snižování vlhkosti zeminy. Vzhledem k tomuto efektu byl písčitý jíl po 24 hodinách lépe zpracovatelný a zlepšovaly se i reologické vlastnosti směsí, především hodnota rozlití. Zeminy míchané s vápnem a zeminou 24 hodin předem vykazovaly větší hodnoty rozlití a přidavek menšího množství vody nutného pro získání tekuté konzistence směsi. V důsledku snížení množství vody se u některých směsí zároveň zvyšovaly pevnosti v tlaku.

Působení vápna na zeminu se projevilo hydratací ($\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca(OH)}_2 + 15,5 \text{ kcal}$), odpařením určitého množství vody a chemickou reakcí tzv. flokulací (vločkováním) jílovitých částic. Z dlouhodobého hlediska reagovaly jílovité částice obsažené v zemině s vápnem velice pomalu. Tyto změny se projevovaly mírným zlepšením geotechnických vlastností směsí (zvýšením pevnosti v prostém tlaku, stabilitou směsi po saturaci, zvýšením odolnosti proti mrazu atd.).

Cement ochotněji reagoval s písčitou zeminou (PZ, také fgrCSa). V čerstvém stavu se cement projevoval jako účinný stabilizátor zeminy, zejména tím, že snižoval sedimentaci částic při míchání směsi a jejím odlití. Cement spolu se zeminou reagoval za vzniku hydratačních produktů (rozpustných gelů), které postupem času krystalizovaly a vytvářely propletenou mřížku, stejně jako tomu bylo u vápna. Jelikož cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R obsahoval i malé množství volného vápna, byl hydratační proces a stabilizace podpořena i jeho přítomností.

Podle zkoušky rozlití se vzorek písčitého jílu saCl (JZ) s přidavkem 1,5 % vápna a vodním součinitelem 0,48 zařadil do třídy SF2, rozlití směsi bylo 710 mm. Hodnota rozlití směsi složené z písčitého jílu saCl (JZ) a 3 % vápna dosahovala 695 mm. Třída rozlití směsi složené z písčitého jílu saCl (JZ) a 3 % vápna je SF1. Písčitý jíl saCl (JZ), ke kterému bylo přidáno 1,5 % vápna a 4 % cementu, dosahovala rozlití 680 mm, patří tak do třídy SF2 (Obr. 45). Do třídy SF1 se řadí i směs složená z písčité zeminy fgrCSa (PZ) míchané spolu s 4 % cementu. Tato směs dosahovala rozlití 590 mm. Směs složená z písčité zeminy fgrCSa (PZ) míchané spolu s 4 % cementu byla zaříděna do třídy SF2. Směs složená z písčité zeminy fgrCSa (PZ), 1,5 % vápna a 4 % cementu dosáhla rozlití 610 mm (Obr. 46). Patří tak do třídy SF1.



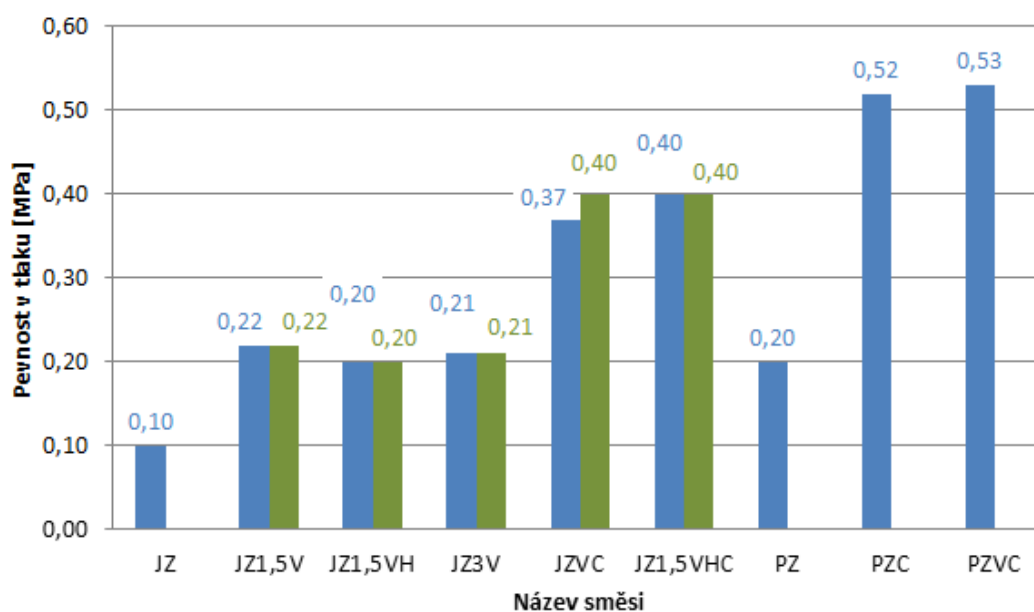
Obr. 45. Rozlití směsi JZVC



Obr. 46. Rozlití směsi PZVC

Obecně lze konstatovat, že přidavek pojiv mírně snižoval hodnotu rozlití směsi, resp. zvyšoval spotřebu vody pro dosažení potřebného rozlití. Bylo to způsobenou okamžitou reakcí pojiv s vodou. Zvýšení hodnoty rozlití může být dosaženo mícháním vápna se zeminou 24 hodin před zpracováním směsi s vodou nebo přidavkem plastifikačních či ztekucujících přísad.

V následující části bude hodnocen vliv složení směsi na pevnost v tlaku vzorků upravených zemin (viz Obr. 47). V případě písčitého jílu saCl (JZ) pouze s příměsí vápna se jedná o pevnosti po čtrnácti dnech zrání. Ostatní vzorky pak byly zkoušeny po 7 dnech. Tento rozdíl je způsoben pomalejším nárůstem pevností, způsobeným vyšším vodním součinitelem a absencí cementu.



Obr. 47. Pevnost v tlaku směsí dle ČSN EN 12390-3 (modře je označena zemina míchaná ihned s vápnem, zeleně je označena zemina míchaná 24 h předem s vápnem)

Jak je patrné z výsledků stanovení pevností v tlaku vzorků pouze s příměsí vápna, ve srovnání se vzorky obsahující cement, nejsou tyto hodnoty příliš vysoké (max. 0,22 MPa). V důsledku vysušení se vlivem objemových změn objevily na vzorcích trhliny, které snižovaly výsledné hodnoty pevnosti v tlaku. Trhliny byly znatelnější u vzorků s příměsí 1,5 % vápna.

V důsledku přidavku cementu do zeminy, jak můžeme vidět na Obr. 47, vzorky získávaly vyšší pevnosti. A také docházelo k menším objemovým změnám.

Všechny písčité zeminy fgrCSa (PZ) z hlediska pevnosti a objemových hmotností dosahovaly podobných hodnot. Pevnosti těchto vzorků vycházely lépe, než u vzorků z písčitého jílu saCl (JZ) (Obr. 47). Také po překročení únosnosti byly vzorky kompaktnější, kdežto u písčitého jílu saCl (JZ) se vzorky ihned začaly drolit.

U zemin se pevnost v tlaku běžně pohybuje okolo 0,2 – 0,3 MPa. Po přidání cementu do směsi byla hodnota 0,3 MPa překonána. Písčité zeminy fgrCSa (PZ) dosahovaly vyšších pevností v tlaku oproti písčitému jílu saCl (JZ). Nejnížší pevnosti byly naměřeny u písčitého jílu saCl (JZ) pouze s přidavkem vápna, které navíc muselo být zkoušeno po čtrnácti dnech.

Experimentálně tedy bylo stanoveno, že přidavek nehašeného vápna 24 hodin předem může u některých druhů zemin zlepšovat jejich reologické vlastnosti a snižovat vlhkost. Proto pokud by to bylo in situ možné, doporučuje se jako předúprava zemin jejich míchání s vápnem 24 hodin předem. Tento proces ovšem není nezbytně nutný. Z hlediska účinku cementu k daným druhům zemin lze konstatovat, že již malý přidavek cementu může ovlivnit výsledné pevnosti v tlaku.

V návaznosti na provedené pilotní zkoušky stabilizace vybraných druhů zemin bylo provedeno rozšířené testování, zahrnující větší množství kombinací hlavních dvou pojivových příměsí a také různá stáří zkušebních vzorků. S ohledem na reálné podmínky stavenišť, kde je nutné vykopanou zeminu bez odkladu na místě zpracovat, byla zvolena varianta mísení jednotlivých složek společně, bez stabilizace vápnem 24 hodin před ztekucením.

Testovány byly tři vybrané typy zemin (písčitý jíl saCl, mírně jílovitý jemnozrnný šterkovitý hrubozrnný písek fgrCSa a jíl Cl). Byl ověřován vliv příměsí 1,5 a 3,0 % páleného nehašeného vápna a následně i příměsí cementu CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R v dávkách 2, 4 a 6 a 8 % a to jak bez současné příměsí vápna, tak včetně 1,5 a 3,0% příměsí. Na čerstvé směsi byla zaznamenána vlhkost zeminy pro dosažení požadovaného rozliti

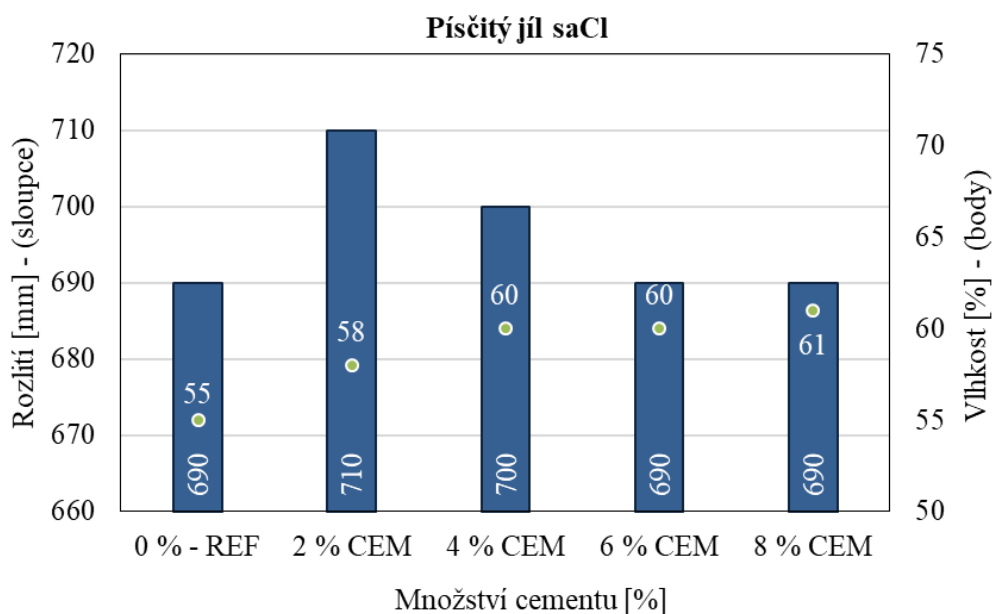
dle ČSN EN 12350-8 a po uložení do forem byla stanovena objemová hmotnost. Po 7, 14, 28 a 90 dnech pak byla stanovena opět objemová hmotnost, pevnost v tlaku a smrštění. V následujícím textu jsou uvedeny hlavní charakteristiky testovaných směsí na bázi vybraných druhů zeminy.

4.2.2 Samozhutnitelné zálivky na bázi saCl

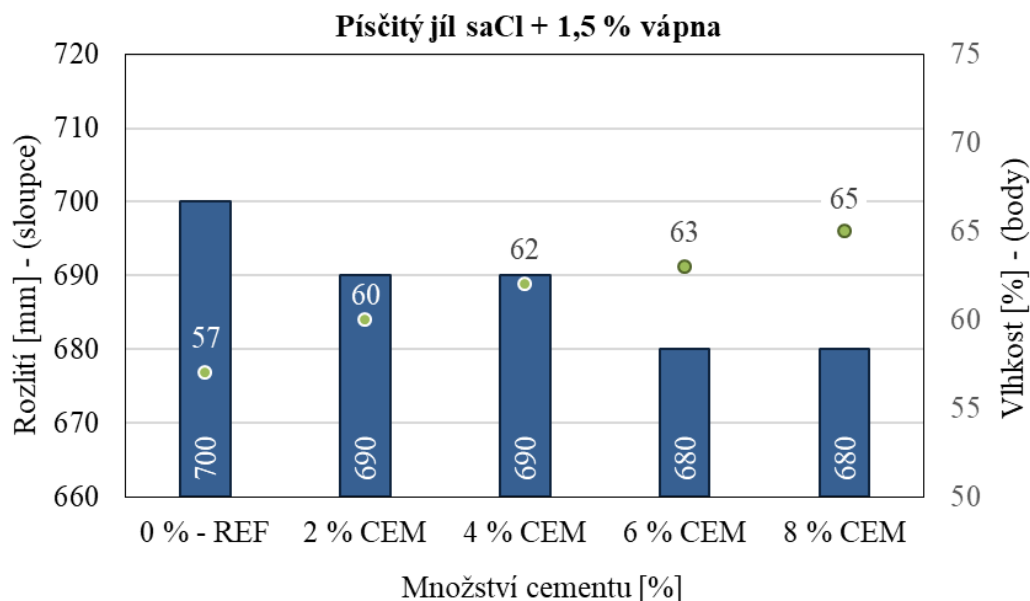
Prvním ověřovaným typem zeminy byl písčitý jíl saCl odebraný z lokality Brno – Medlánky. Na tomto písčitém jílu saCl byly postupně ověřovány vlastnosti navržených směsí, jak v čerstvém, tak v zatvrdlém stavu. Výsledky laboratorního testování jsou uvedeny v následujících grafech (Obr. 48 až Obr. 59).

4.2.2.1. Stanovení sednutí-rozlítí

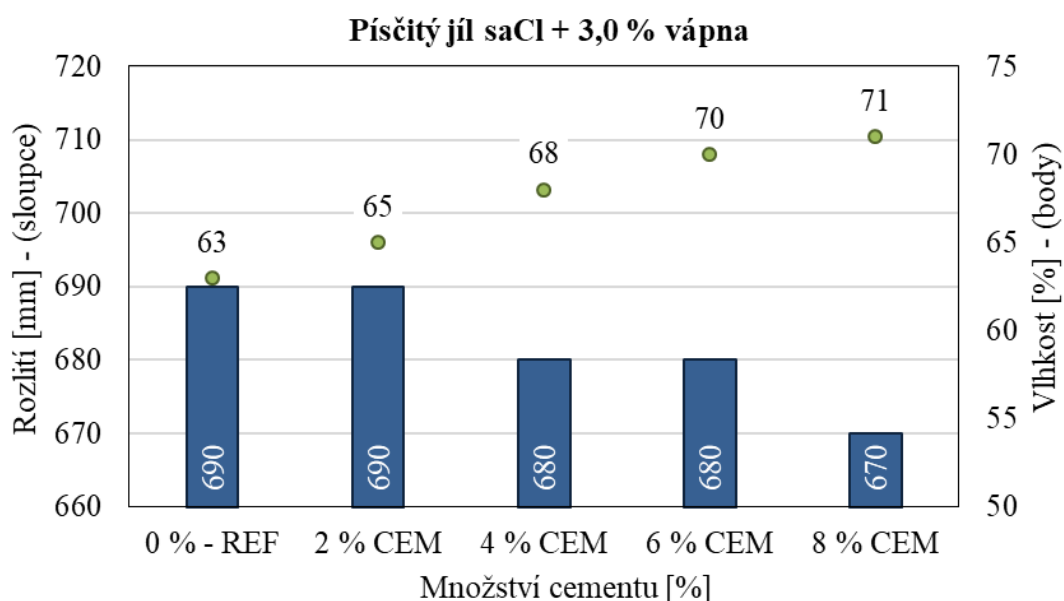
Prvním parametrem, který se u navržených samozhutnitelných záливоček stanovoval, bylo stanovení rozlité směsí v čerstvém stavu podle normy ČSN EN 12350-8 [84]. Dle této normy jsou hodnoty rozlité rozděleny do třídy SF1 (550 – 650 mm), SF2 (660 - 750) a SF3 (760 – 850 mm). U samozhutnitelných záливоček se doporučuje, aby hodnota rozlité byla v rozmezí třídy SF2 až SF3 z důvodu snadného obtékání směsí kolem IS a aby vyplnila prostor i v těch méně dostupných místech. Pro zajištění relevantnosti, z hlediska použitého množství vody, bylo snahou, aby se hodnoty rozlité samozhutnitelných záливоček pohybovaly v rozmezí od 660 mm do 750 mm (třída SF2).



Obr. 48. Závislost rozlité na vlhkosti směsí na bázi saCl a 0 % – 8 % cementu



Obr. 49. Závislost rozlití na vlhkosti směsi na bázi saCl, 1,5 % vápna a 0 % - 8 % cementu



Obr. 50. Závislost rozlití na vlhkosti směsi na bázi saCl, 3,0 % vápna a 0 % - 8 % cementu

Obr. 48 až Obr. 50 znázorňuje vliv vápna a cementu na rozlití směsi na bázi písčitého jílu saCl v závislosti na množství vlhkosti potřebné pro dosažení optimální konzistence. Na Obr. 48 jsou uvedeny směsi samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl pouze s příměsí 2 % až 8 % cementu. Z Obr. 49 můžeme vidět, že tyto samozhutnitelné zálivky navíc obsahovaly 1,5 % vápna. Obr. 50 znázorňuje samozhutnitelné zálivky ve kterých bylo použito vápno v množství 3,0 %.

Experimentálně bylo u samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl stanoveno, že se zvyšujícím se podílem vápna ve směsi narůstá potřebná vlhkost pro dosažení optimálního rozlití. Tento jev byl způsoben okamžitou reakcí při míchání vápna se zeminou a vodou. Tuto reakci lze popsat podle následující rovnice: $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2 + 65 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, kdy v první fázi docházelo k hydrataci páleného vápna a ve druhé fázi docházelo k vypařování části vody obsažené v zemině na základě působení tepla uvolňujícího se při exodermální reakci. Z hlediska obsahu vody v jednotlivých směsích lze zároveň konstatovat, že obsahovaly dostatečné množství vody potřebné pro úplné vyhašení vápna a iontovou výměnu mezi vápenatými ionty hydratovaného vápna a alkalickými ionty jílových minerálů. Množství vody potřebné pro dosažení optimální konzistence bylo zároveň ovlivněno i množstvím jemnozrnných jílovitých částic ($f = 69,53 \%$), které mají tendenci na sebe vázat vyšší množství vody. Na základě experimentálních výsledků lze říci, že u písčitého jílu saCl je množství vody, potřebné pro získání optimální konzistence, poměrně vysoké. Tento fakt se navíc zvyšuje se zvyšujícím se množstvím vápna a cementu. Nejvyšší vlhkosti (71 %), tedy množství vody potřebné pro optimální rozlití, bylo dosaženo u samozhutnitelné zálivky složené z písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna a 8 % cementu.

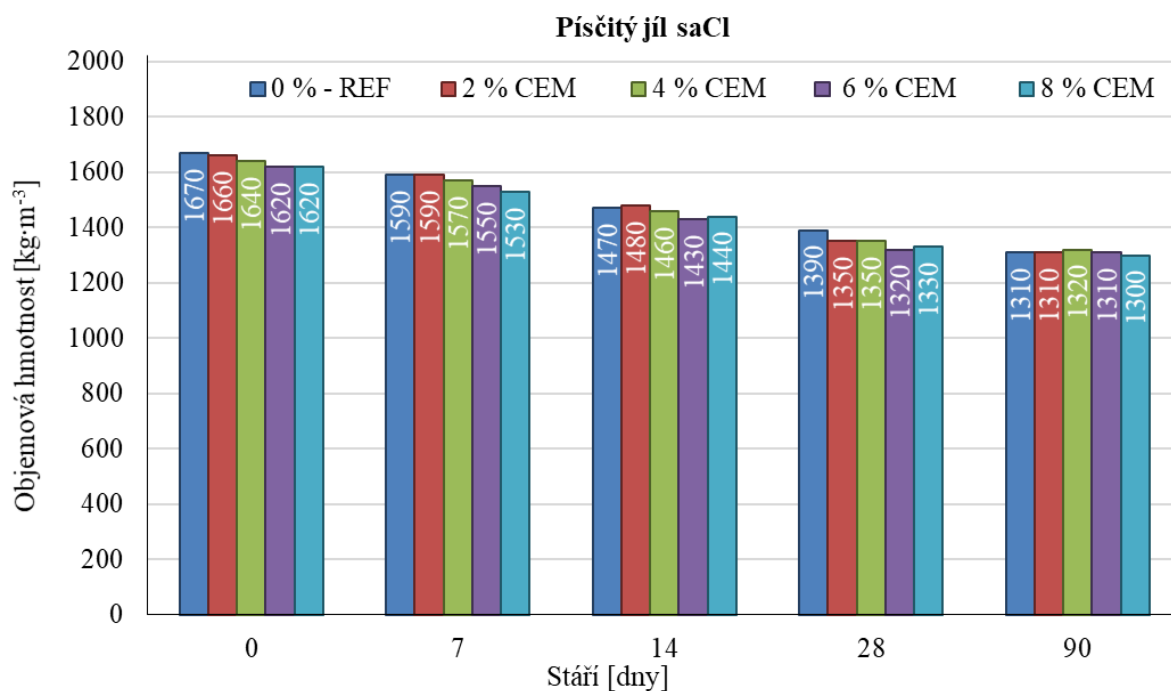
Při srovnání parametru rozlití samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl bez (REF směs) a spolu s cementem (viz. Obr. 48) lze konstatovat, že cement hodnotu rozlití významně neovlivňoval. Se zvyšujícím se množstvím cementu mírně docházelo ke zvyšování potřebného množství vody nutného pro stanovení optimálního rozlití, ovšem tento jev byl způsoben především narůstajícím množstvím vápna (viz. Obr. 49 a Obr. 50). Množství cementu ve směsi ovlivňovalo především samotnou zkoušku rozlitím, kdy je nezbytné dodržovat stejné časové úseky při mísení a provádění zkoušky tak, aby nebylo rozlití ovlivněno tuhnutím směsi. Cement totiž ihned po smíchání zeminy s vodou vede ke vzniku hydratačních dějů, kdy v první fázi dochází k rozpouštění cementových částic, což má za následek zvýšení iontové koncentrace ve vodním prostředí samozhutnitelné zálivky. Proces hydratace a vznik primárních hydratačních produktů je důležitý především pro následný vývoj pevnosti zeminy v čase.

Obecně lze konstatovat, že u všech samozhutnitelných zálivek bylo, na základě optimalizace vlhkosti, dosaženo rozlití směsí v rozmezí od 660 mm do 750 mm (třídy SF2). Z hlediska reologických vlastností se jako optimální jevílo použití samozhutnitelných zálivek složených z písčitého jílu saCl, 1,5 % vápna a 2 a 4 % cementu.

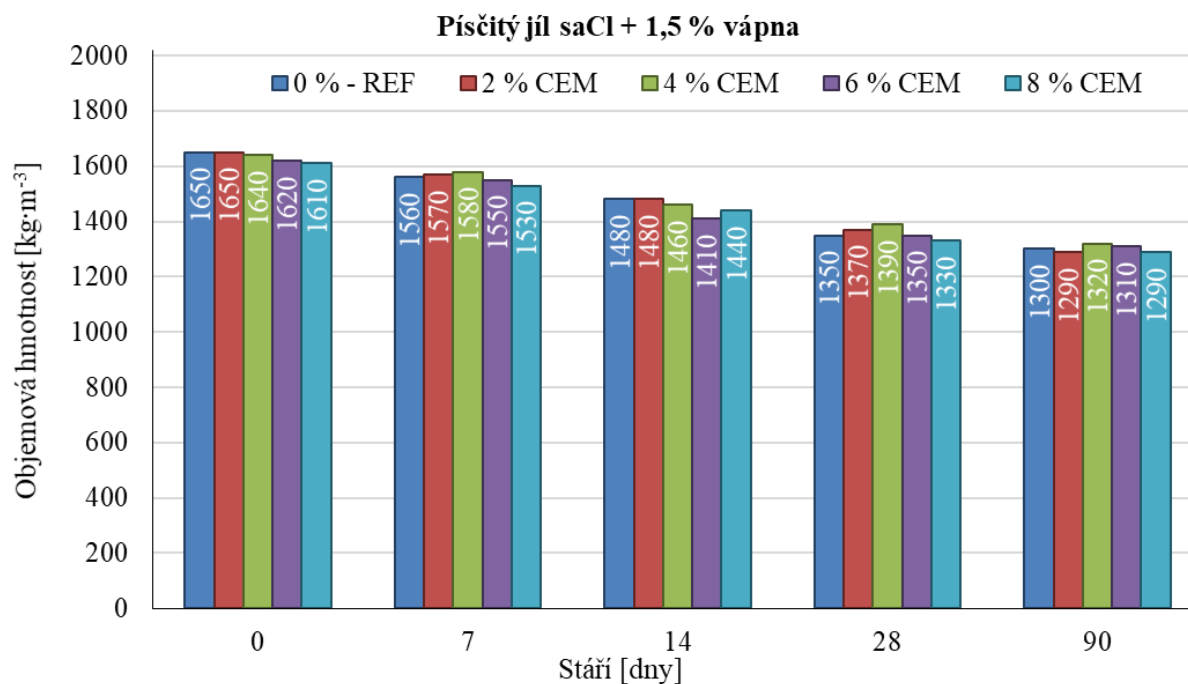
U těchto samozhutnitelných zálivek bylo dosaženo rozlití 690 mm při vlhkosti 60 % (2 % cementu) a 62 % (4 % cementu).

4.2.2.2. Stanovení objemové hmotnosti

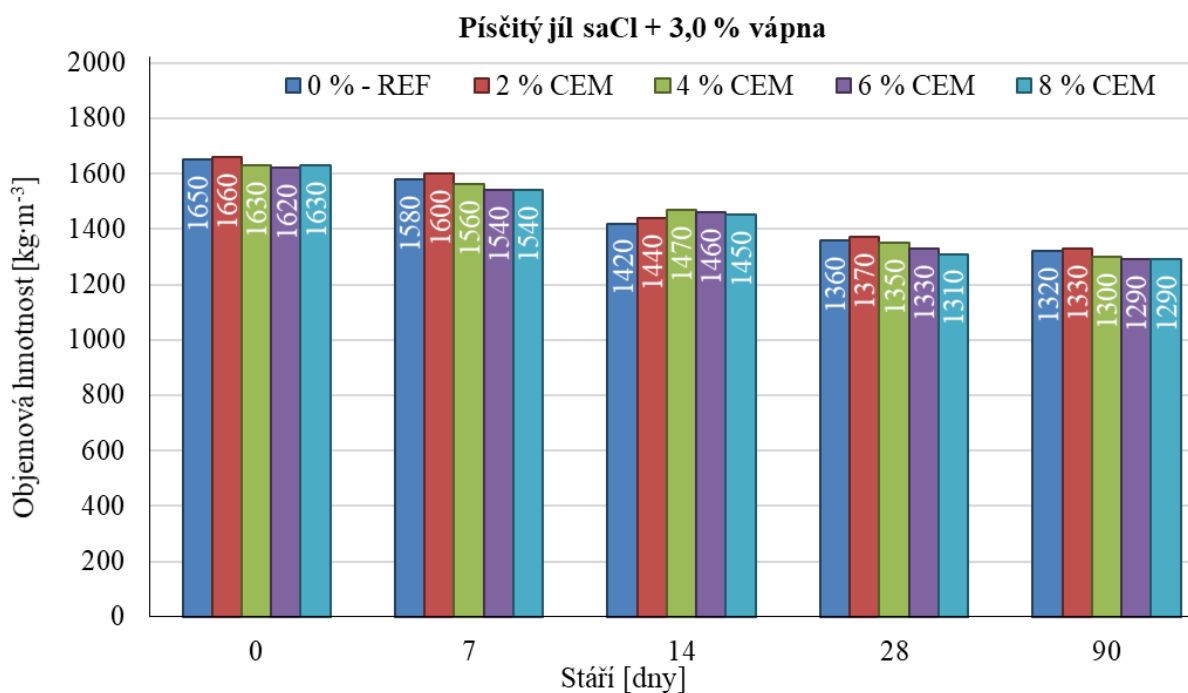
Dalším testovaným parametrem bylo stanovení objemové hmotnosti směsí jak v čerstvém, tak v zatvrdlém stavu. Zkouška stanovení objemové hmotnosti byla prováděna podle normy ČSN EN 12350-6. [86] Objemová hmotnost samozhutnitelných zálivek primárně souvisí s použitým druhem zeminy (kameniva) a nejsou pro ni dány přesná specifikata, které by měla zálivka splňovat.



Obr. 51. Výsledky objemových hmotností čerstvých a zatvrdlých směsí na bázi saCl a 0 % - 8 % cementu



Obr. 52. Výsledky objemových hmotností čerstvých a zatvrdlých směsí na bázi saCl, 1,5 % vápna a 0 % - 8 % cementu



Obr. 53. Výsledky objemových hmotností čerstvých a zatvrdlých směsí na bázi saCl, 3,0 % vápna a 0 % - 8 % cementu

Na Obr. 51 až Obr. 53 jsou uvedeny výsledné hodnoty objemových hmotností samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl. Na prvním Obr. 51 jsou uvedeny objemové hmotnosti zálivek obsahujících 2 % až 8 % cementu (bez vápna). A v následujících grafech jsou uvedeny výsledky objemových hmotností samozhutnitelných zálivek nejprve s přidavkem 1,5 % vápna (Obr. 52) a poté s 3,0 % vápna (Obr. 53).

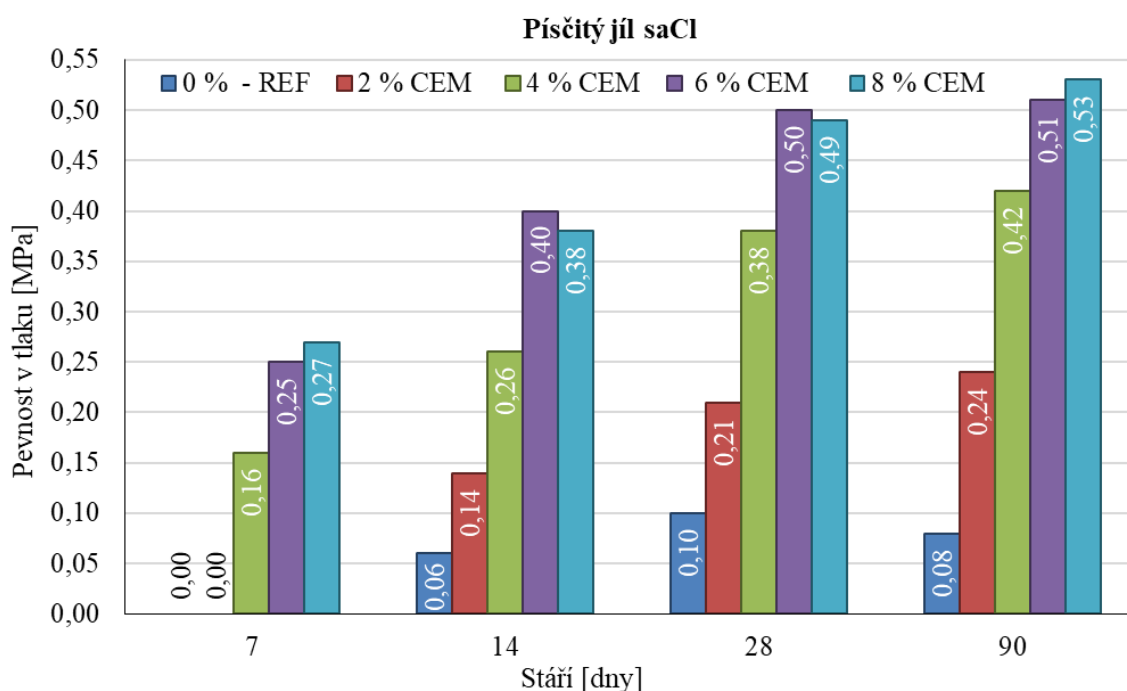
V návaznosti na předchozí zkoušku, stanovení sednutí-rozlítím samozhutnitelných zálivek, lze konstatovat, že objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek byly do jisté míry ovlivněny množstvím použité vody, nutným pro získání optimální hodnoty rozliti a dále množstvím použitého druhu pojiv. Mírné zvýšení objemových hmotností ($1660 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) bylo zaznamenáno u směsí bez přísadků vápna a s nižším obsahem (2 %) cementu. V těchto případech totiž základní bázi tvořil pouze objem zeminy a vody. S přibývajícím množstvím pojiv docházelo k nahrazování primární složky, kterou je zemina, a tím i ke zvyšování potřebného množství vody. Tento jev měl v některých případech směsí za následek snižování objemové hmotnosti.

Na základě experimentálního stanovení objemových hmotností lze říci, že zvyšující se množství vápna v samozhutnitelné zálivce (Obr. 52 – 1,5 % vápna a Obr. 53 – 3,0 % vápna) výrazně neovlivňovalo změnu objemových hmotností. S přibývajícím množstvím vápna docházelo, u některých druhů samozhutnitelných zálivek pouze k mírnému zvýšení potřebného množství vody, a tím k mírnému snížení objemových hmotností. Z hlediska porovnání samozhutnitelných zálivek ovšem nebyly zaznamenány výrazné rozdílné vlastnosti objemových hmotností. Z grafů je zřejmé, že u všech směsí se postupem času (po 7, 14, 28 a 90 dnech zrání) objemová hmotnost snižuje, což bylo způsobeno úbytkem vody ve vzorcích.

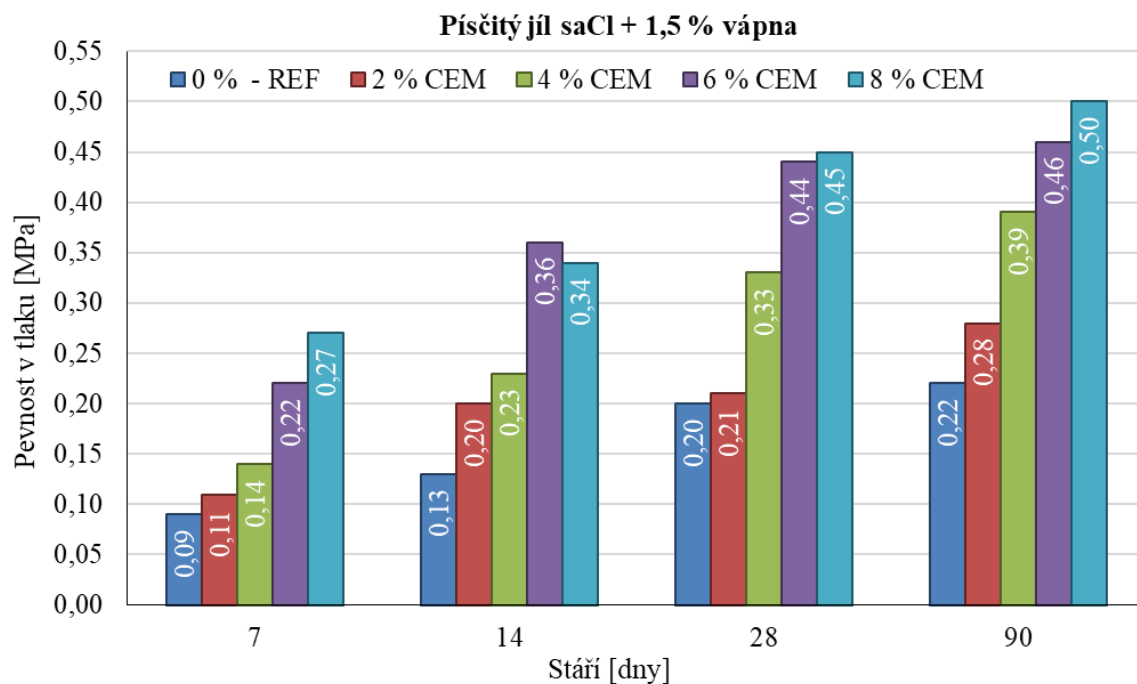
Stejný či podobný efekt jako vápno měl, při hodnocení objemových hmotností, na samozhutnitelné zálivky i cement. Při porovnání objemových hmotností samozhutnitelných zálivek lze konstatovat, že se zvyšujícím se množstvím cementu docházelo k mírnému zvyšování množství vody, potřebného pro získání optimální hodnoty rozliti a tím k mírnému snižování objemových hmotností zálivek. Nejnižší hodnoty objemové hmotnosti $1620 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ tak bylo dosaženo u samozhutnitelné zálivky obsahující písčité jílu saCl a 8 % cementu. Postupem času se i u směsí, které obsahovaly určité množství cementu, postupně snižovaly hodnoty objemových hmotností. Tento fakt, byl ovlivněn úbytkem vody ve směsích po určité době zrání (7, 14, 28 a 90 dnech). S tím také, jak bude uvedeno dále, souvisí i hodnoty smrštění.

4.2.2.3. Stanovení pevnosti v tlaku

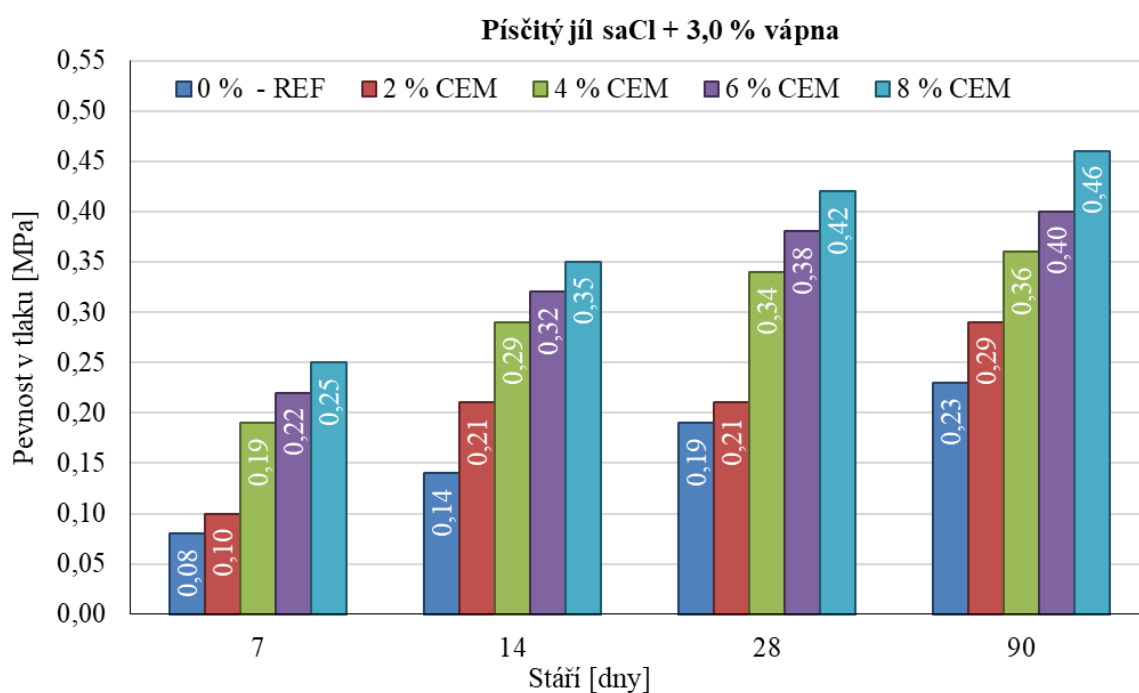
Zkouška stanovení pevnosti v tlaku se prováděla na samozhutnitelných zálivkách za účelem kontroly adekvátnosti a jednotnosti. Z hlediska sledovaných parametrů samozhutnitelných zálivek patří tato zkouška mezi jednu z nejdůležitějších, a to především z toho důvodu, že po určité době (3, 7 a 28 dnech) by měly zálivky splňovat požadované parametry pevností v tlaku, s čímž koreluje i jejich únosnost. Tento parametr úzce souvisí se složením samozhutnitelných směsí. Na základě normových požadavků se doporučuje, aby vyhloubitelné zálivky měly pevnost v tlaku po třech dnech zrání větší jak 0,14 MPa a po 28 dnech zrání větší jak 0,2 MPa. Maximální pevnosti v tlaku, které můžou samozhutnitelné zálivky po 28 dnech zrání dosáhnout je doporučena na 2,1 MPa. Zkouška stanovení pevnosti v tlaku byla prováděna podle normy ČSN EN 12390-3 [89].



Obr. 54. Hodnoty pevností v tlaku směsí na bázi saCl a 0 % – 8 % cementu



Obr. 55. Hodnoty pevností v tlaku směsí na bázi saCl, 1,5 % vápna a 0 % – 8 % cementu



Obr. 56. Hodnoty pevností v tlaku směsí na bázi saCl, 3,0 % vápna a 0 % – 8 % cementu

Na Obr. 54 až Obr. 56 jsou uvedeny pevnosti v tlaku zkoušených směsí na bázi písčitého jílu saCl po 7, 14, 28 a 90 dnech zrání. Obr. 54 uvádí pevnosti v tlaku samozhutnitelných

zálivek obsahujících pouze cement (0 – 8 % cementu, bez přídavku vápna). Na Obr. 55 jsou zobrazeny samozhutnitelné zálivky na bázi písčitého jílu saCl s obsahem 0 – 8 % cementu a přídavkem 1,5 % vápna. Výsledky pevností v tlaku zálivek obsahujících vyšší množství vápna (3,0 %) jsou uvedeny na Obr. 56.

Při hodnocení vlivu složení samozhutnitelných zálivek na pevnost v tlaku je patrné, že dosažení vyšších pevností v tlaku pouze pomocí vápna je na limitu použitelnosti (viz Obr. 55 a Obr. 56). Pouze v jednom případě dosahovala pevnost v tlaku po 28 dnech zrání 0,2 MPa (písčitý jíl saCl, 1,5 % vápna). Je však zřejmé, že vyšší dávka vápna (viz Obr. 56, 3,0 % vápna) není nutná a pro dosažení alespoň 0,2 MPa po 7 dnech je 1,5% příměs dostačující. Z grafů je zároveň patrné, že směsi obsahující menším množstvím vápna (1,5 %) dosahovaly oproti předpokladu větších pevností, ve srovnání se směsmi obsahující 3,0 % vápna. Tento jev byl pravděpodobně způsoben vytvořením pórovitější struktury v souvislosti s přibývajícím množstvím vápna. Z Obr. 54 je zároveň vidět, že směs zeminy bez vápna, s 2 % cementu, byla příliš zavlhlá na to, aby bylo možné stanovit její pevnost v tlaku po 7 dnech zrání. Z tohoto důvodu jsou zde uvedeny nulové hodnoty.

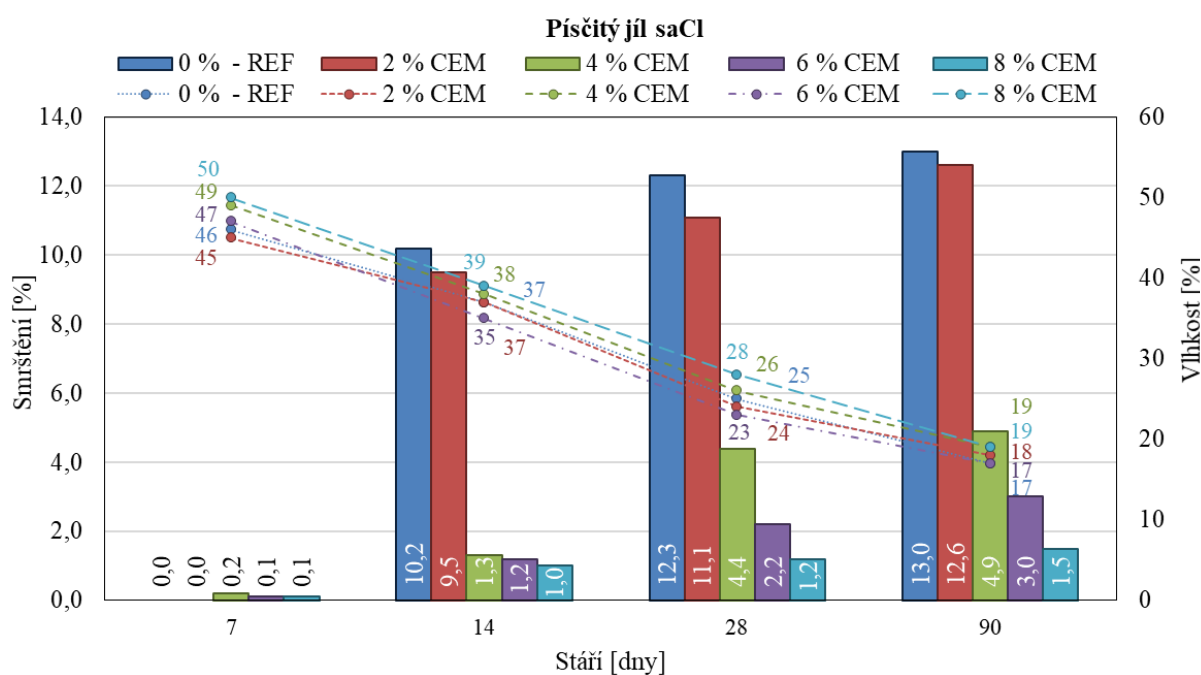
Z hlediska působení vápna na zeminu lze konstatovat, že vývoj počátečních a následných pevností v tlaku, je ovlivněn reakcí oxidu vápenatého s vodou za vzniku hydroxidu vápenatého, což dále vede k rozpouštění SiO_2 a Al_2O_3 z jílovitých částí zeminy za vzniku sloučenin, které reagují s vápníkem. Vzniklé novotvary tvoří hydráty křemičitanů a hlinitanů vápenatých, což jsou produkty podobné těm, jež vznikají v cementové pastě. Obecně lze konstatovat, že vyšších hodnot pevností v tlaku dosahovaly směsi obsahující 1,5 % vápna, ve srovnání se směsmi obsahující 3,0 % vápna.

Hodnocení vzorků s příměsí cementu ukazuje, že se zvyšujícím se podílem cementu ve směsi rostou jak krátkodobé, tak dlouhodobé pevnosti. Optimální variantou je pak 1,5% příměs vápna a 4% příměs cementu, kdy pevnosti v tlaku po 7 dnech atakují potřebných 0,2 MPa a dlouhodobé pevnosti zůstávají v přijatelných mezích běžných pevností zemin pro zajištění možnosti případné vyhloubitelnosti zálivky v případě nutných oprav uloženého vedení apod. Obecně lze konstatovat, že vyšších pevností lze dosáhnout vyšší dávkou cementu. Volba množství pojiva ovšem musí být vždy v souladu s ekonomickým hlediskem.

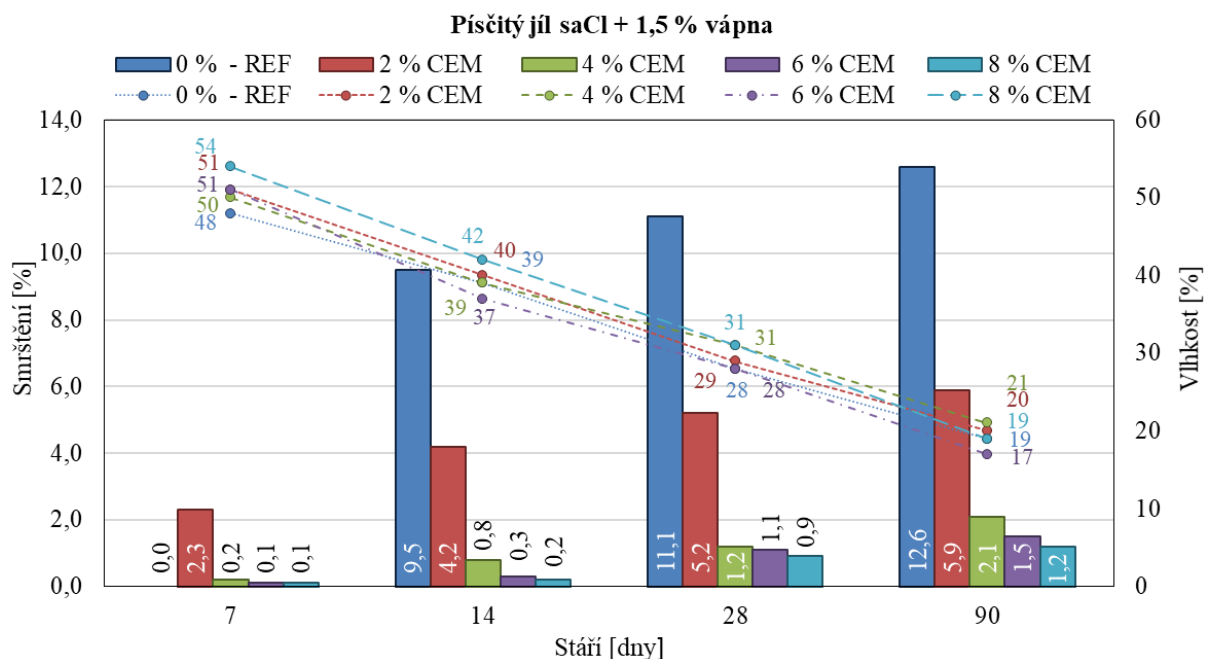
4.2.2.4.Stanovení smrštění a vlhkosti

Posledním testovaným parametrem samozhutnitelných zálivek bylo stanovení smrštění. Tato zkouška byla provedena podle ČSN EN 72 1019 [90]. Snahou je, aby hodnota smrštění

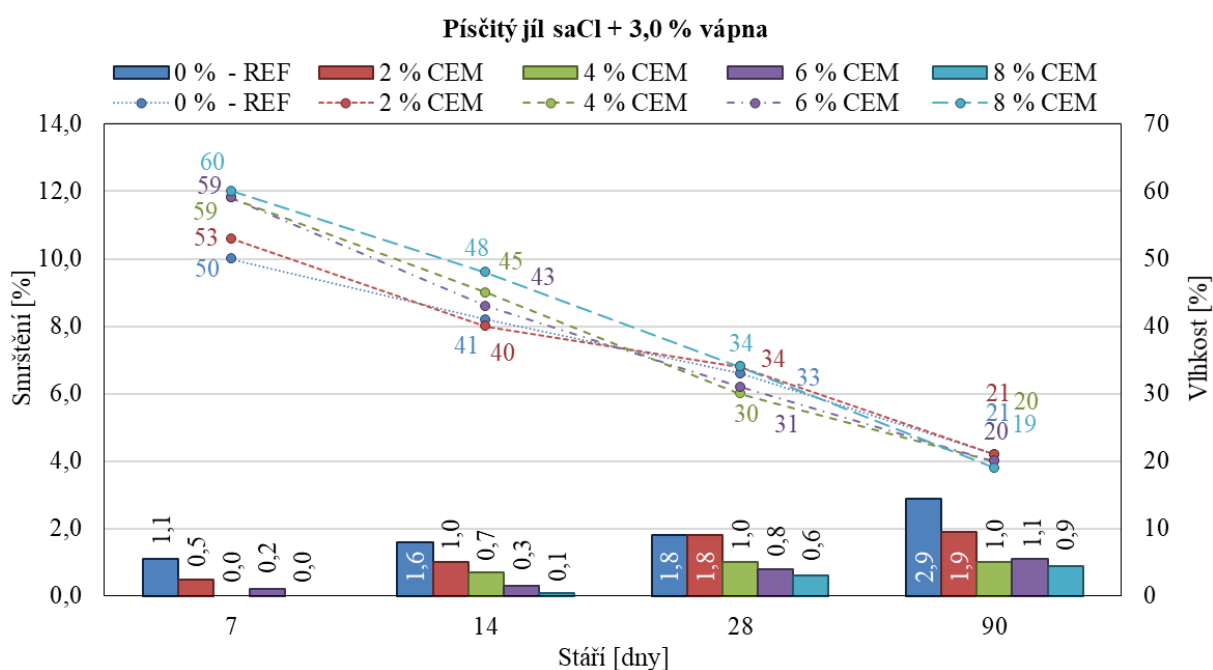
samozhutnitelných zálivek byla co nejmenší. Pro samozhutnitelné zálivky na bázi zemin není dán přesný parametr smrštění, kterého by mělo být dosaženo. Ovšem při předpokladu, že mohou být tyto zálivky využívány pro vyplnění prostor kolem IS, na kterých se předpokládá pokládka chodníku, mimoúrovňové komunikace či zeleně, je snahou, aby nedocházelo k poklesům či jakýmkoliv destrukcím povrchových vrstev, způsobeným právě smrštěním. Pro eliminaci smrštění samozhutnitelných zálivek bylo při jejich návrhu použito pojiv (vápna, cementu), které by měly zálivky účinně stabilizovat, a to i po delší době zrání. V následujících grafech (Obr. 57 až Obr. 59) jsou uvedeny výsledky působení pojiv na hodnotu smrštění samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl po určité době zrání.



Obr. 57. Závislost smrštění na vlhkosti směsi na bázi saCl a 0 % – 8 % cementu



Obr. 58. Závislost smrštění na vlhkosti směsí na bázi saCl, 1,5 % vápna a 0 % – 8 % cementu



Obr. 59. Závislost smrštění na vlhkosti směsí na bázi saCl, 3,0 % vápna a 0 % – 8 % cementu

Obr. 57 až Obr. 59 znázorňují smrštění směsí na bázi jílovité zeminy saCl naměřené v daných časových intervalech a to po 7, 14, 28 a 90 dnech zrání. Na Obr. 57 můžeme vidět

výsledky hodnot smrštění samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl pouze s obsahem 0 % až 8 % cementu. Na následujícím Obr. 58 jsou uvedeny zálivky, u kterých bylo kromě 0 % až 8 % cementu obsaženo i vápno v množství 1,5 %. Na Obr. 59 pak můžeme vidět výsledné hodnoty smrštění samozhutnitelných zálivek obsahujících vápno v množství 3,0 %.

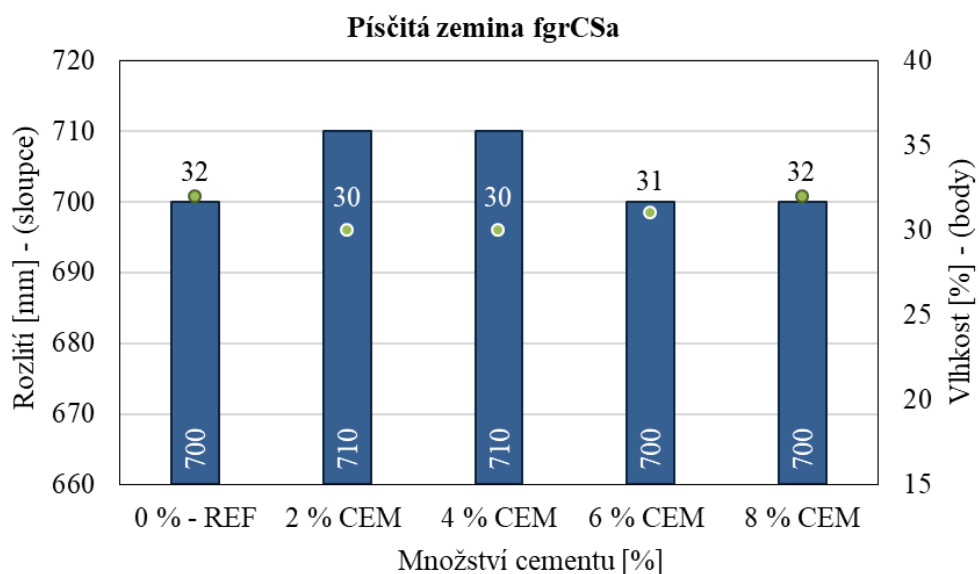
Obecně lze konstatovat, že vyšší množství vlhkosti, u čerstvých směsí, způsobilo v čase větší úbytek vody a tím také větší smrštění. Z Obr. 57 lze vidět, že největší smrštění bylo zaznamenáno u směsi složené pouze z písčitého jílu saCl a vody. V tomto případě bylo dosaženo hodnoty smrštění až 13,0 %, po 90 dnech zrání. Tento fakt byl způsoben především obsahem jílovitých částic v saCl, které mají za následek na sebe vázat větší množství vody, jež se postupem času ze zálivky uvolňuje, což způsobilo větší smrštění.

K postupnému snižování smrštění docházelo u samozhutnitelných zálivek jednak s délkou vytvrzování a také s přibývajícím množstvím pojiv. Při srovnání 1,5 % a 3,0 % přídavku vápna k písčitému jílu saCl (viz Obr. 58 a Obr. 59) lze konstatovat, že menšího smrštění bylo dosaženo u směsí obsahujících 3,0 % vápna (Obr. 59).

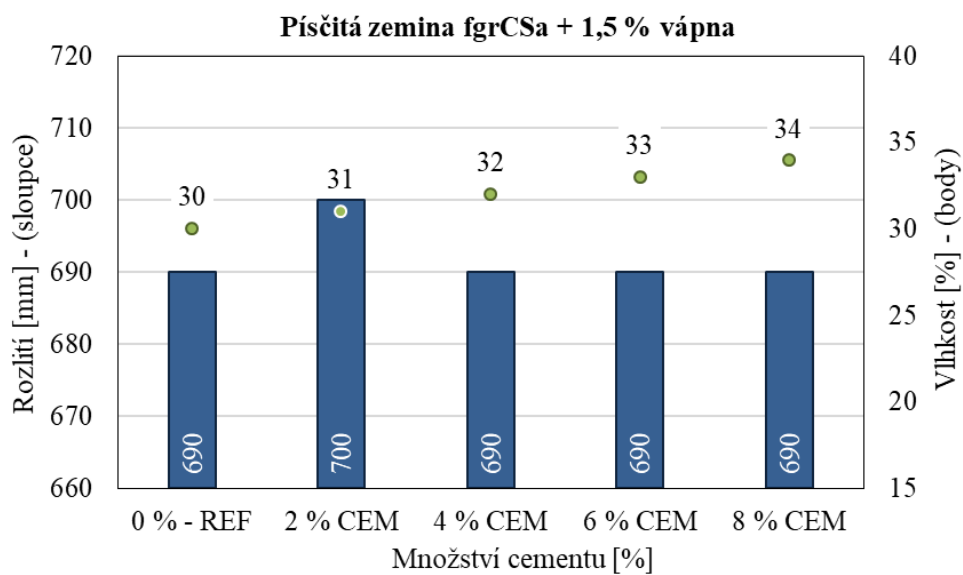
Při hodnocení účinku cementu na hodnotu smrštění zálivek bylo zjištěno, že nejmenšího smrštění dosahovaly směsi s nejvyšším množstvím cementu (8,0 %), navíc ještě v kombinaci s dávkou vápna v množství 3,0 %. V tomto případě měla samozhutnitelná zálivka smrštění 0,6 % po 28 dnech zrání. Z výsledků hodnot smrštění lze usuzovat, že pro snížení této hodnoty je vhodné použití vyšší dávky vápna (v případě písčitého jílu saCl 3,0 %) a vyšší dávky cementu (alespoň 4 %). Nutno je ovšem poznamenat, že množství použitého cementu musí být voleno i s ohledem na dosažení optimální pevnosti v tlaku a ceny.

4.2.3 Samozhutnitelné zálivky na bázi fgrCSa

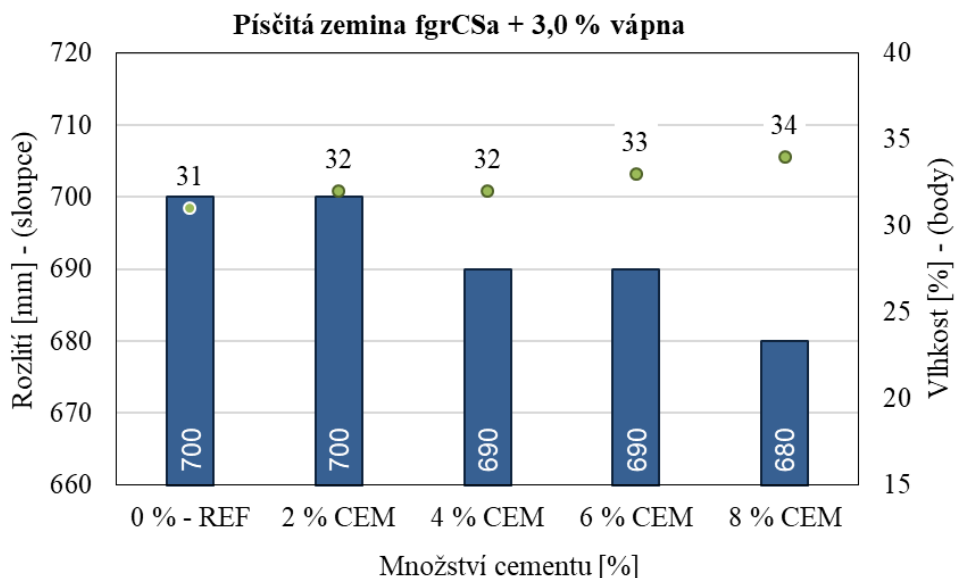
Druhým ověřovaným typem zemin byl „mírně jílovitý jemnozrný šterkovitý hrubozrný písek – fgrCSa“ odebraný z lokality Brno – Černovice. Na této písčité zemině fgrCSa byly, stejně jako u předchozí zeminy (písčitého jílu saCl), postupně ověřovány vlastnosti navržených směsí, jak v čerstvém, tak v zatvrdlém stavu. Výsledky laboratorního testování jsou uvedeny v následujících grafech (Obr. 60 až Obr. 71).

4.2.3.1. Stanovení sednutí-rozlitím

Obr. 60. Závislost rozlití na vlhkosti směsí na bázi fgrCSa a 0 % – 8 % cementu



Obr. 61. Závislost rozlití na vlhkosti směsí na bázi fgrCSa, 1,5 % vápna a 0 % – 8 % cementu



Obr. 62. Závislost rozliti na vlhkosti směsí na bázi fgrCSa, 3,0 % vápna a 0 % – 8 % cementu

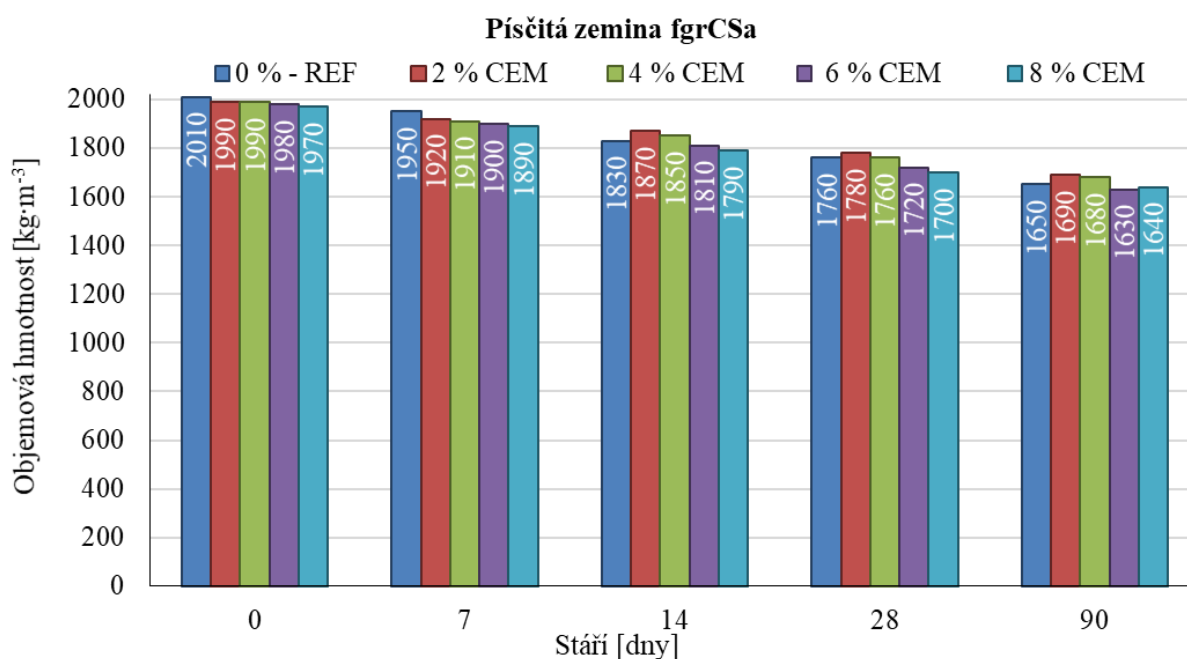
Na Obr. 60 až Obr. 62 lze vidět závislost hodnot rozliti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa se zvyšujícím se množstvím vápna (1,5 % a 3,0 %) a cementu (0 % – 8 %). Na prvním Obr. 60 jsou uvedeny výsledky hodnot rozliti navržených samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa s přidavkem 0 % (REF) až 8 % cementu (bez vápna). V dalších dvou grafech (viz Obr. 61 a Obr. 62) jsou zobrazeny výsledky hodnot rozliti samozhutnitelných zálivek, u kterých bylo kromě cementu (0 – 8 %) navíc přidáno vápno v množství 1,5 % (Obr. 61) a 3,0 % (Obr. 62).

V porovnání hodnot rozliti směsí s předchozí jílovitou zeminou saCl, lze konstatovat, že samozhutnitelné zálivky na bázi písčité zeminy fgrCSa dosahovaly stejného či podobného rozliti, ovšem při nižším obsahu vlhkosti. Tento fakt byl způsoben tím, že písčítá zemina fgrCSa obsahovala ve srovnání s předchozí jílovitou zeminou saCl mnohem menšího množství jemnozrnných jílovitých částic ($f = 9,55\%$), které mají tendenci na sebe vázat větší množství vody.

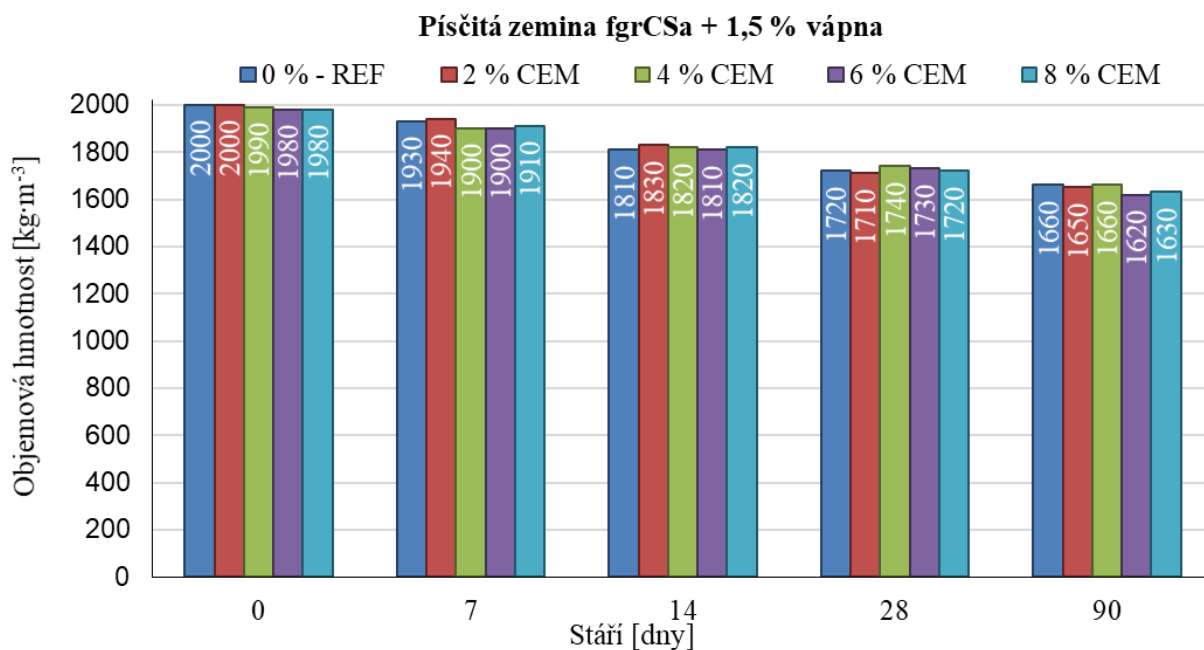
Z výsledků grafů (Obr. 61 a Obr. 62) lze konstatovat, že přidavek vápna k písčité zemině fgrCSa, ať už v množství 1,5 % (Obr. 61) či 3,0 % (Obr. 62), výrazně neovlivňovalo hodnoty rozliti. Větší vliv na snížení parametru rozliti mělo zvyšující se množství cementu. S narůstajícím množstvím cementu docházelo ke snižování hodnoty rozliti směsi, což bylo způsobeno okamžitou reakcí (hydratací) cementu s vodou. Nejnížší hodnoty rozliti 680 mm, při vlhkosti 34 %, tak bylo dosaženo u směsí složené z písčité zeminy fgrCSa, 3,0 % vápna a 8 % cementu.

Směsi na bázi písčité zeminy fgrCSa také často vykazovaly mírný bleeding. Tento jev byl způsoben nepravidelnou křivkou zrnitosti, a především nižším obsahem jemnozrnných částic, jež byly v zemině obsaženy v množství $f = 9,55 \%$. Na základě tohoto jevu by se pro snížení bleedingu a zlepšení křivky zrnitosti doporučilo použití např. jiných druhů zemin či vedlejších energetických produktů.

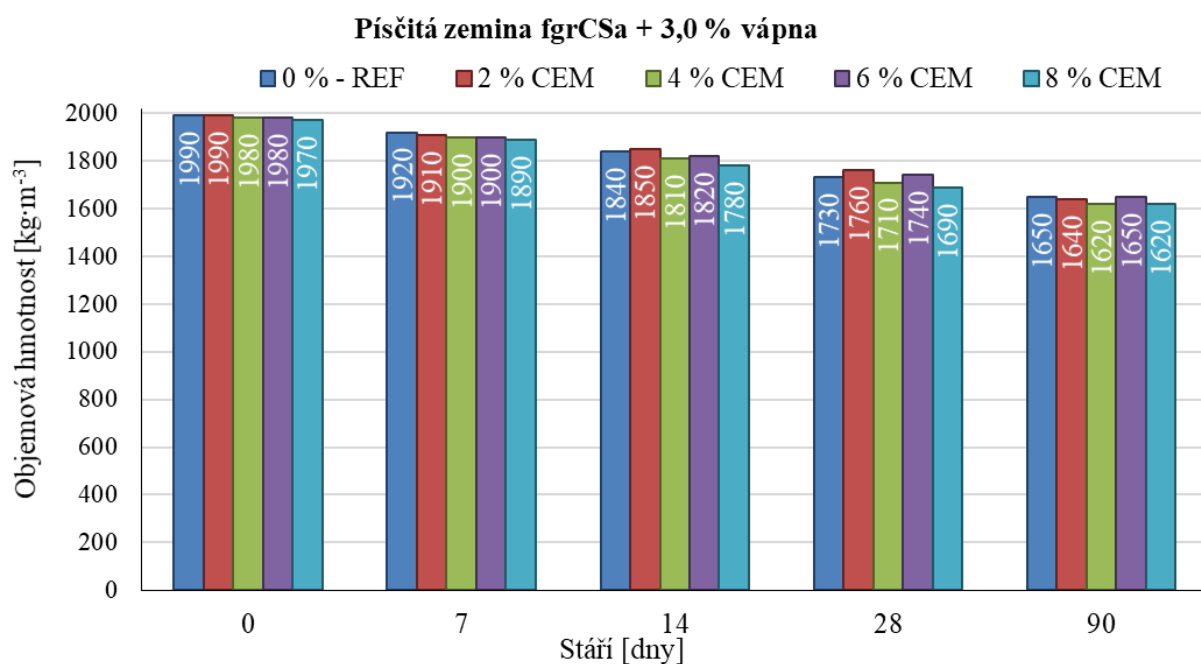
4.2.3.2. Stanovení objemové hmotnosti



Obr. 63. Výsledky objemových hmotností čerstvých a zatvrdlých směsí na bázi fgrCSa a 0 % – 8 % cementu



Obr. 64. Výsledky objemových hmotností čerstvých a zatvrdlých směsí na bázi fgrCSa, 1,5 % vápna a 0 % – 8 % cementu



Obr. 65. Výsledky objemových hmotností čerstvých a zatvrdlých směsí na bázi fgrCSa, 3,0 % vápna a 0 % – 8 % cementu

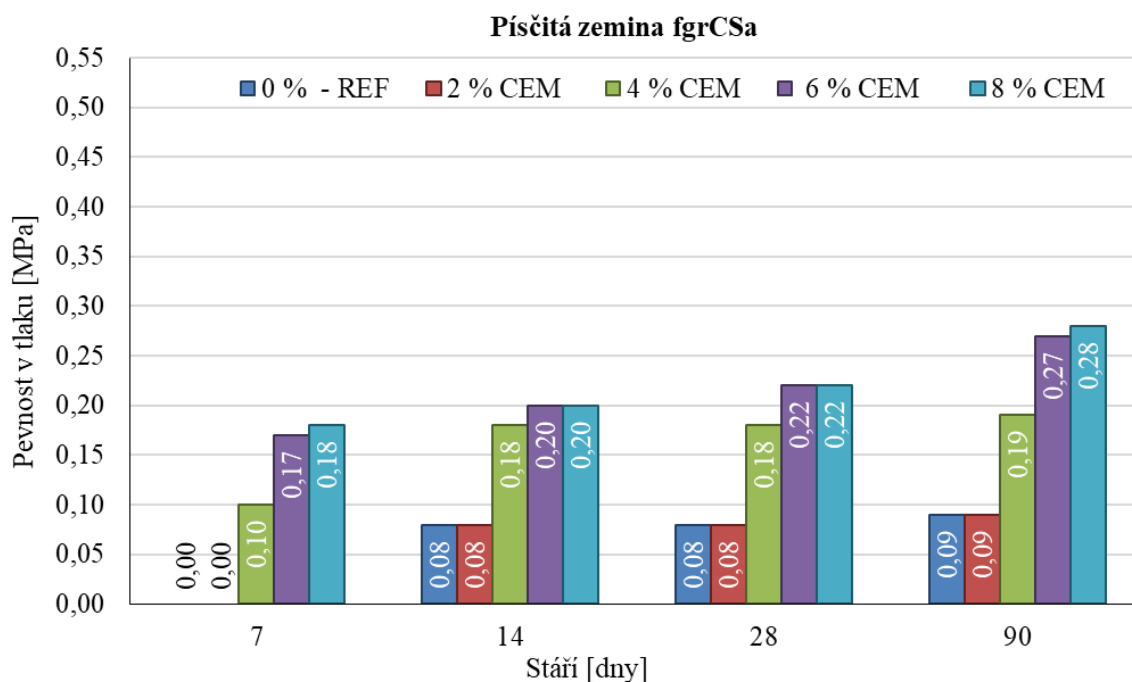
Obr. 63 až Obr. 65 znázorňují výsledky objemových hmotností samozhutnitelných zálivek na bázi písečné zeminy fgrCSa, 1,5 % až 3,0 % vápna, 2 %, 4 %, 6 % a 8 % cementu.

Na Obr. 63 jsou zobrazeny samozhutnitelné zálivky na bázi písčité zeminy fgrCSa a 0 – 8 % cementu (bez přídavku vápna). V dalším grafu (Obr. 64) jsou uvedeny hodnoty objemových hmotností směsí na bázi písčité zeminy fgrCSa obsahujících 0 – 8 % cementu a 1,5 % vápna. Na Obr. 65 jsou zobrazeny výsledky objemových hmotností samozhutnitelných zálivek obsahujících cement v množství 0 – 8 % a vápno v množství 3,0 %.

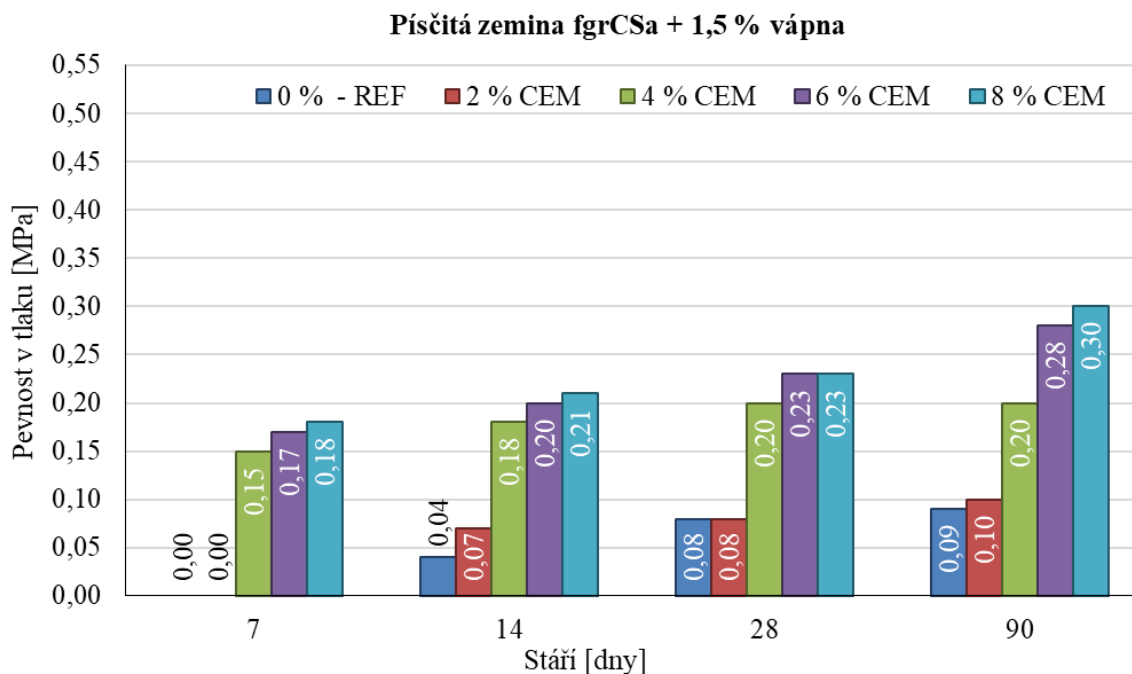
Ve srovnání objemových hmotností samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, s předchozími zálivkami na bázi jílovité zeminy saCl, lze říci, že vyšší objemové hmotnosti byly naměřeny u směsí obsahujících písčitou zeminu fgrCSa. Je to dáno složením písčité zeminy fgrCSa, která obsahuje, ve srovnání s jílovitou zeminou saCl, větší množství křemičitých složek, jež mají za následek větší objemovou hmotnost.

Z Obr. 64 lze zároveň vidět, že směsi obsahující 1,5 % vápna a vyšší množství cementu (až 8 %) dosahovaly nejvyšších hodnot objemových hmotností ($1720 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, po 28 dnech zrání). S přibývajícím množstvím vápna (3,0 %) se objemové hmotnosti mírně snižovaly (viz. Obr. 65). Tento fakt souvisí především s množstvím vody, které se ke směsím přidávalo v čerstvém stavu pro získání optimální hodnoty rozlití zálivek. Se zvyšujícím se množstvím vápna docházelo k mírnému zvyšování vody, a tedy k mírnému zvýšení objemových hmotností. Z hlediska vlivu cementu na směsi obsahující písčitou zeminu fgrCSa lze konstatovat, že s přibývajícím dávkou cementu nedocházelo k výrazným objemovým změnám. Obecně u všech směsí docházelo ke snižování objemových hmotností v průběhu času (po 7, 14, 28 a 90 dnech zrání), což bylo způsobeno odpařováním vody ze vzorků.

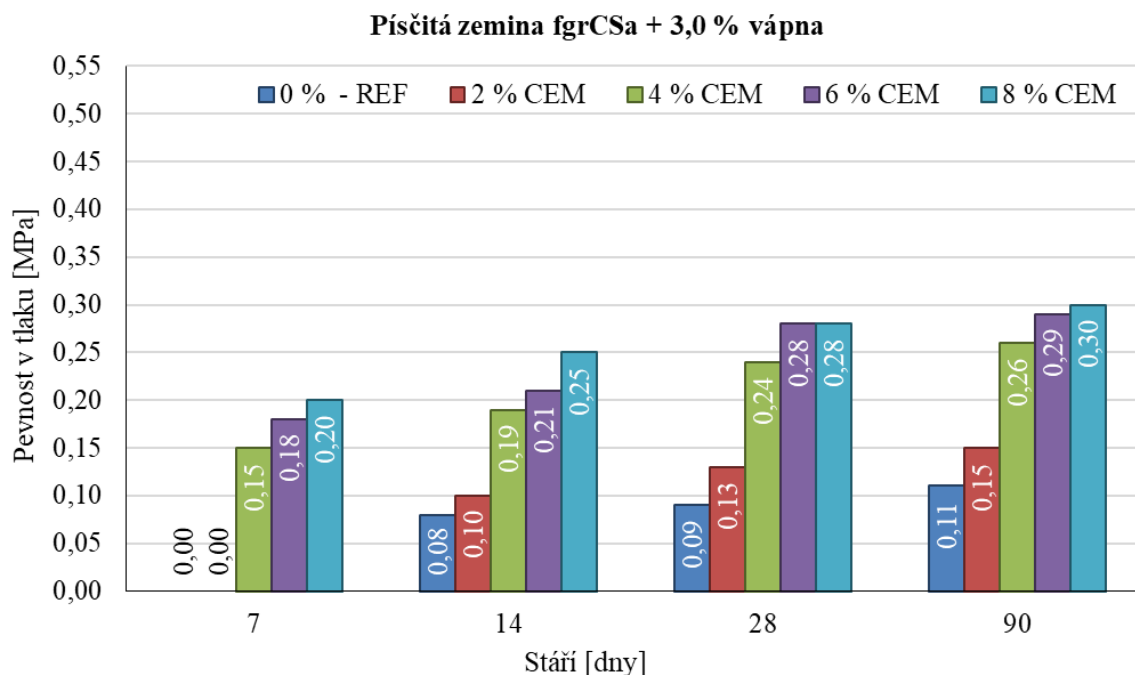
4.2.3.3. Stanovení pevnosti v tlaku



Obr. 66. Hodnoty pevností v tlaku směsí na bázi fgrCSa a 0 % – 8 % cementu



Obr. 67. Hodnoty pevností v tlaku směsí na bázi fgrCSa, 1,5 % vápna a 0 % – 8 % cementu



Obr. 68. Hodnoty pevností v tlaku směsí na bázi fgrCSa, 3,0 % vápna a 0 % – 8 % cementu

Na Obr. 66 až Obr. 68 jsou uvedeny výsledné hodnoty pevností v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi fgrCSa po určité době zrání (7, 14, 28 a 90 dnech). V prvním grafu (Obr. 66) jsou uvedeny hodnoty pevnosti v tlaku zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa obsahující pouze cement v množství 0 – 8 % (bez přídavku vápna). Na následujícím grafu (Obr. 67) jsou vyobrazeny hodnoty objemových hmotností samozhutnitelných zálivek obsahujících jak cement, v množství 0 – 8 %, tak vápno, v množství 1,5 %. V grafu Obr. 68 můžeme vidět výsledky hodnot objemových hmotností zálivek složených z písčité zeminy fgrCSa, 0 – 8 % cementu a 3,0 % vápna.

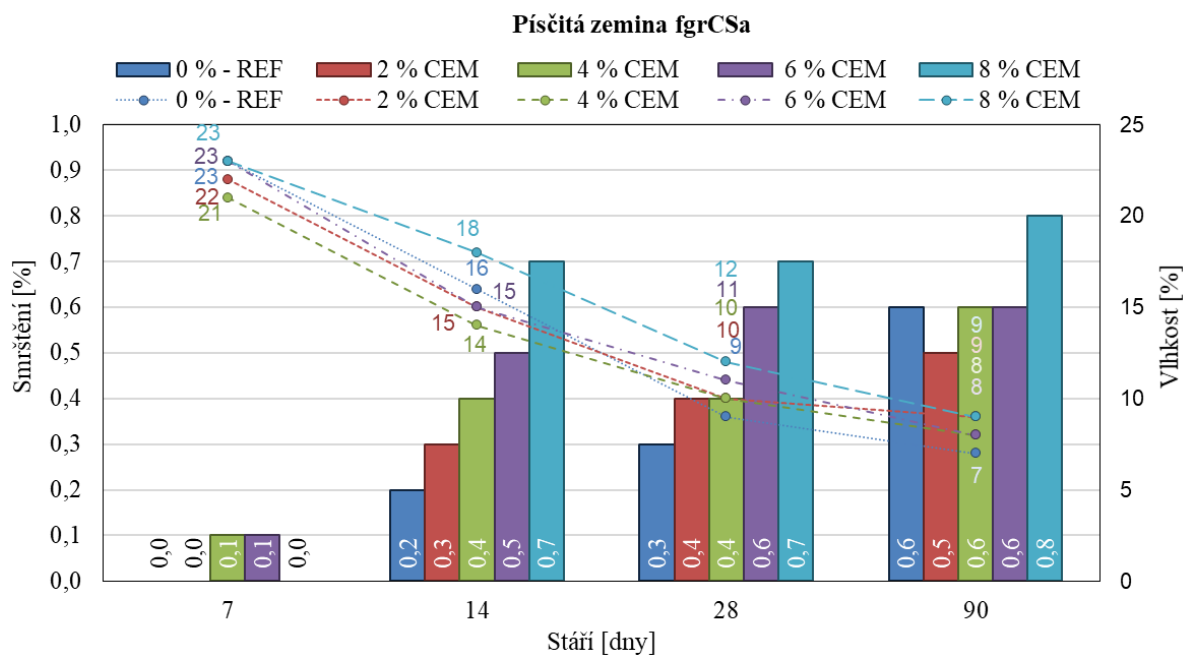
Výsledky pevností v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, jak je uvedeno na Obr. 66 až Obr. 68 ukazují, že dosahují ve srovnání s předchozími zálivkami na bázi jílovité zeminy saCl (Obr. 54 až Obr. 56) nižších pevností. Tento fakt byl způsoben především nepravidelnou granulometrickou křivkou písčité zeminy, ve které chyběla jemnozrnná frakce.

Obecně lze z grafů Obr. 66 až Obr. 68 vidět, že se zvyšující se dávkou vápna a cementu docházelo k mírnému zvyšování hodnot pevnosti v tlaku. Tyto hodnoty se zároveň ještě zvyšovaly v průběhu času (po 7, 14, 28 a 9 dnech zrání), což bylo způsobeno hydratačními procesy vznikajícími mezi pojivem a vodou. Vzhledem k povaze písčité zeminy fgrCSa lze říci,

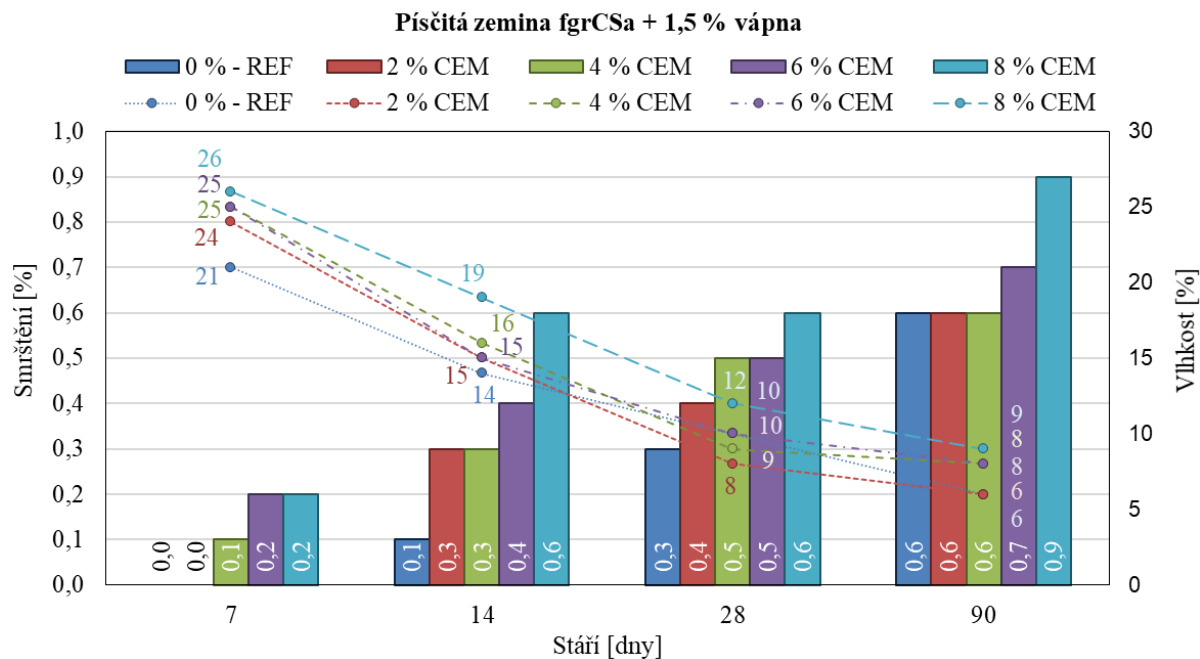
že větší vliv na zvýšení hodnoty pevnosti v tlaku měl, ve srovnání s vápnem, přírůstek cementu. Vápno totiž ochotněji reagovalo s jílovými minerály, jak bylo uvedeno u předchozích směsí na bázi jílovité zeminy saCl, kdežto cement lépe reagoval s křemičitými složkami obsaženými ve směsích na bázi písčité zeminy fgrCSa. Na základě tohoto zjištění lze konstatovat, že pro zvýšení hodnot pevnosti v tlaku a stabilizaci samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa byl účinnější přírůstek cementu než vápna.

Obecně z hodnocení vlivu přírůstku cementu na pevnost v tlaku směsí na bázi písčité zeminy fgrCSa vyplývá, že písčitá zemina potřebuje 4 % až 6 % cementu a minimálně 1,5 % vápna pro dosažení pevností v tlaku 0,2 MPa po 28 dnech. To je způsobeno především zrnitostí zeminy, kterou by bylo vhodné korigovat např. jinými druhy zemin či vedlejšími energetickými produkty. Pevnost v tlaku a stabilita směsi může být také ovlivněna použitím vhodné plastifikační přísady, o čemž bude pojednáno v rámci III. Etapy této disertační práce.

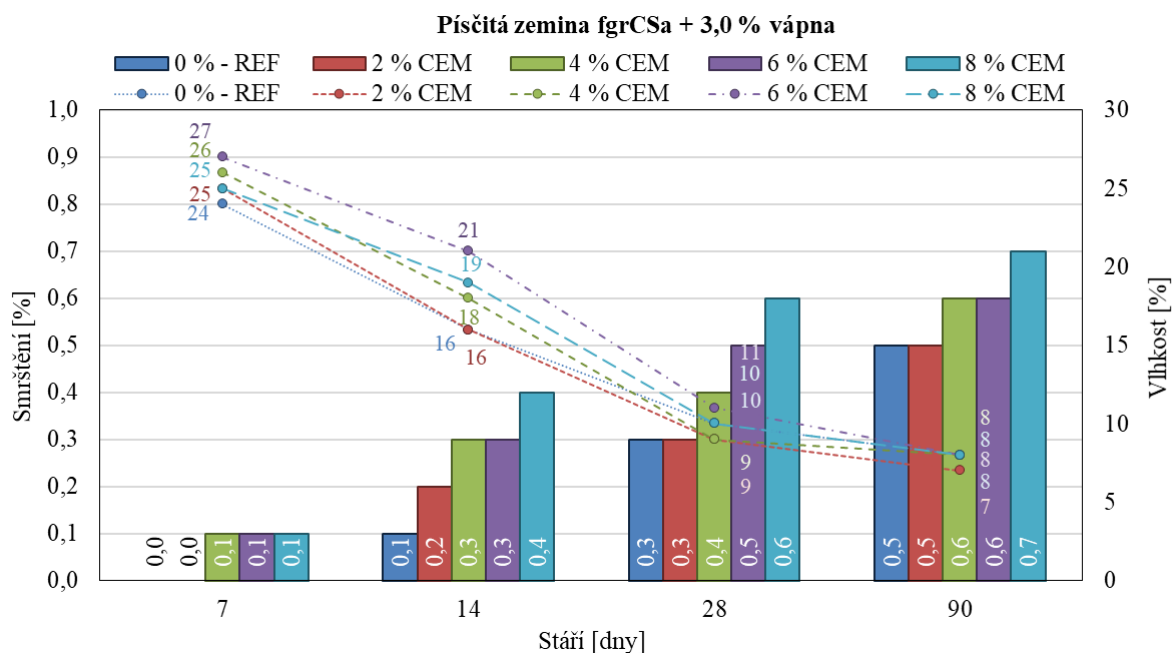
4.2.3.4. Stanovení smrštění a vlhkosti



Obr. 69. Závislost smrštění na vlhkosti směsí na bázi fgrCSa a 0 % – 8 % cementu



Obr. 70. Závislost smrštění na vlhkosti směsi na bázi fgrCSa, 1,5 % vápna a 0 % – 8 % cementu



Obr. 71. Závislost smrštění na vlhkosti směsi na bázi fgrCSa, 3,0 % vápna a 0 % – 8 % cementu

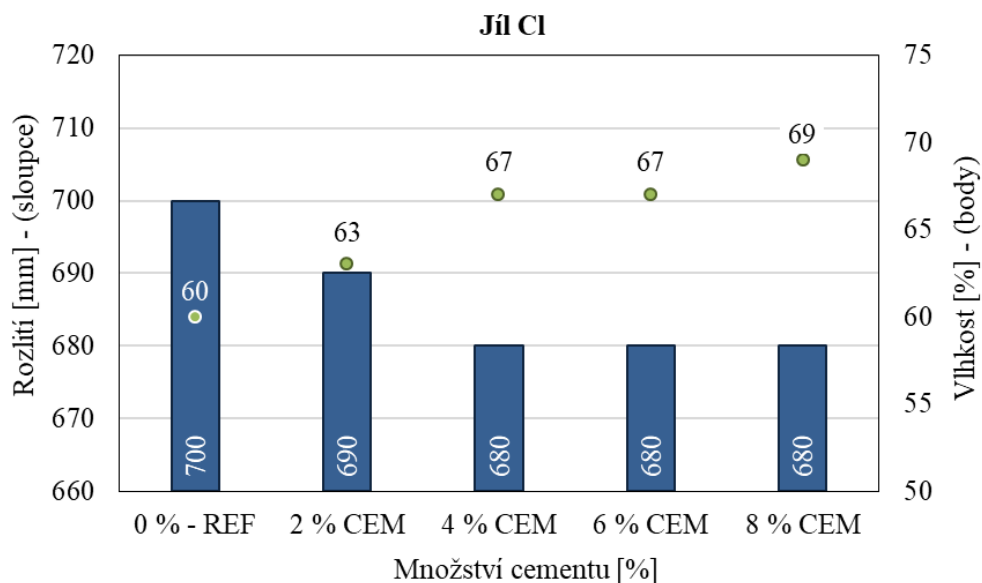
Na Obr. 69 až Obr. 71 je uvedena závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 0 – 3,0 % vápna a 0 % - 8 % cementu. Obr. 69 uvádí výsledky hodnot smrštění, v závislosti na vlhkosti, zálivek na bázi písčitého jílu

fgrCSa spolu s přidavkem 0 – 8 % cementu. Na Obr. 70 můžeme vidět hodnoty smrštění zálivek obsahujících kromě cementu (0 – 8 %) i vápno v množství 1,5 %. Výsledky smrštění samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 0 – 8 % cementu a 3,0 % vápna jsou uvedeny na Obr. 71.

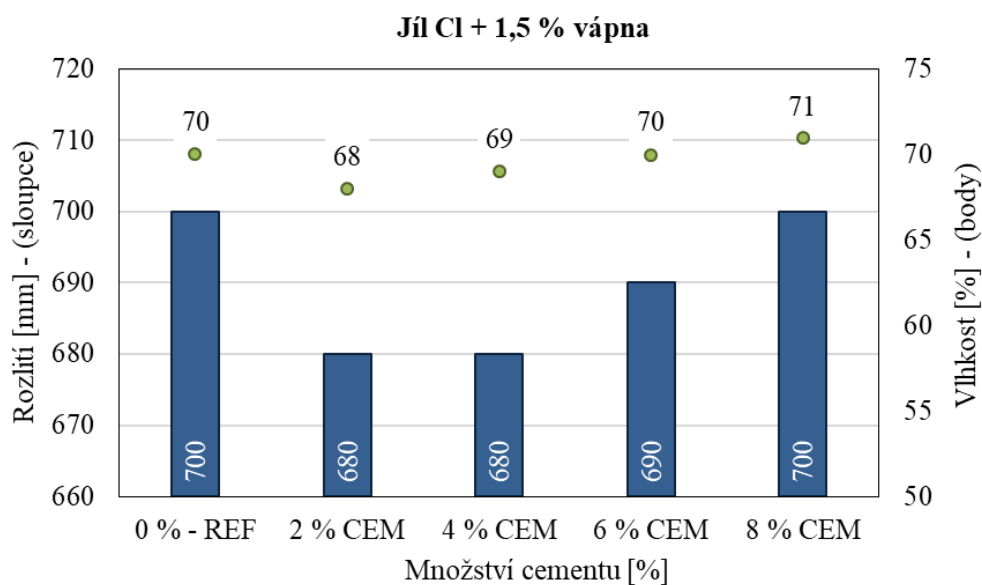
Při porovnání hodnot smrštění směsí na bázi jílovité zeminy saCl (Obr. 60 až Obr. 62) a písčité zeminy fgrCSa (Obr. 69 až Obr. 71) zeminy lze konstatovat, že menšího smrštění (v některých případech až o 4,5 % i více) bylo dosaženo u směsí na bázi písčité zeminy fgrCSa. Tento fakt byl způsoben tím, že písčitá zemina fgrCSa obsahovala menší množství jílových minerálů, které na sebe mají tendenci vázat větší množství vody, jenž se postupem času ze směsi uvolňuje a dochází tak k menšímu smrštění. Z grafů Obr. 69 až Obr. 71 lze zároveň vidět, že mírného snížení smrštění bylo dosaženo u zálivek obsahujících větší množství vápna (3,0 %). Hodnota smrštění se zároveň snižovala se zvyšující se dávkou cementu. Nejmenšího smrštění (0,6 %, po 28 dnech zrání) tak bylo dosaženo u samozhutnitelné zálivky složené z písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % (3,0 %) vápna a 8 % cementu. Obecně se hodnoty smrštění zvyšovaly v průběhu zrání (po 7, 14, 28 a 90 dnech), což bylo způsobeno odcházející vodou ze vzorků.

4.2.4 Samozhutnitelné zálivky na bázi Cl

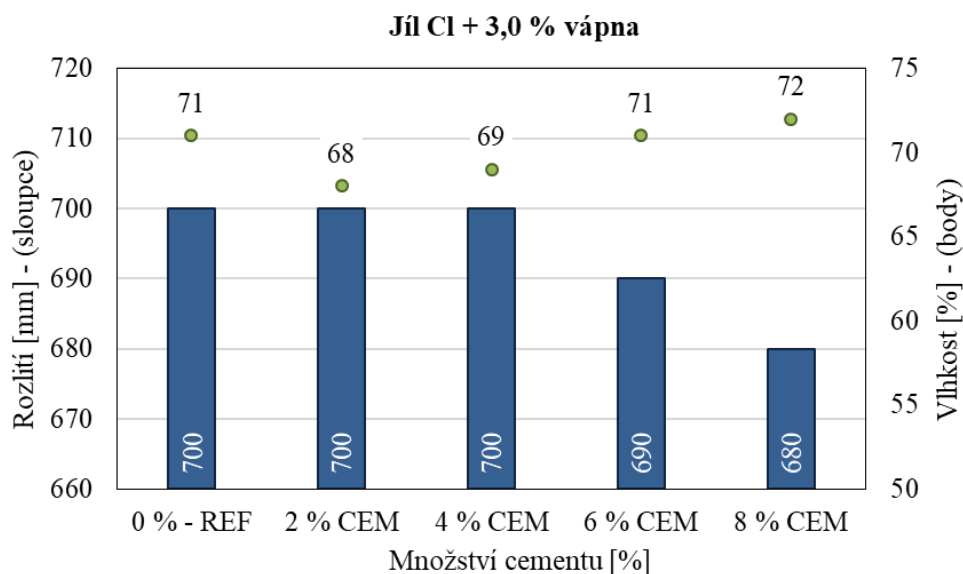
Třetím ověřovaným typem zemin byl jíl Cl odebraný z lokality Brno – ul. Provazníkova. Na tomto jílu byly, stejně jako u předchozích zemin, postupně ověřovány vlastnosti navržených samozhutnitelných zálivek, jak v čerstvém, tak v zatvrdlém stavu. Výsledky laboratorního testování samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl jsou uvedeny v následujících grafech (Obr. 72 až Obr. 83).

4.2.4.1. Stanovení sednutí-rozlitím

Obr. 72. Závislost rozlití na vlhkosti směsí na bázi jílu Cl a 0 % – 8 % cementu



Obr. 73. Závislost rozlití na vlhkosti směsí na bázi jílu Cl, 1,5 % vápna a 0 % – 8 % cementu



Obr. 74. Závislost rozlití na vlhkosti směsi na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna a 0 % – 8 % cementu

Na Obr. 72 až Obr. 74 jsou uvedeny výsledné hodnoty rozlití, v závislosti na množství vlhkosti, samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl. Na prvním grafu (Obr. 72) jsou zobrazeny výsledky rozlití zálivek složených z jílu Cl a 0 – 8 % cementu. V dalším grafu Obr. 73 jsou uvedeny hodnoty rozlití samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 0 – 8 % cementu a 1,5 % vápna. Na Obr. 74 můžeme vidět hodnoty rozlití zálivek obsahujících jíl Cl, 0 – 8 % cementu a 3,0 % vápna.

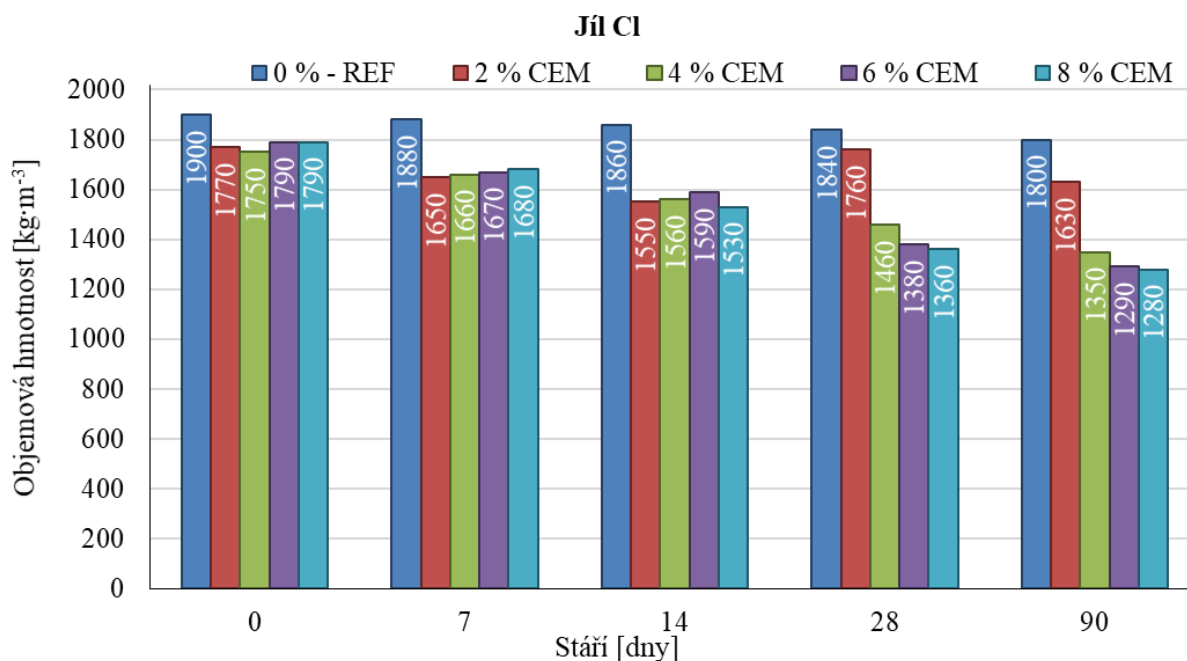
Při sledování závislosti hodnot rozlití na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl a pojiv (0 % – 3,0 % vápna, 0 % – 8 % cementu), jak je vidět na Obr. 72 až Obr. 74, lze konstatovat, že ve srovnání s předchozími dvěma zeminami (jílovitou saCl a písčitou fgrCSa) bylo dosaženo nejvyšších hodnot vlhkosti (až 72 %) pro získání optimální hodnoty rozlití směsí (680 mm – 710 mm). Tento fakt byl způsoben vysokým obsahem jemnozrnných jílovitých částic ($f = 96,99 \%$), jež mají tendenci na sebe vázat velké množství vody. Zvýšení potřebného množství vody ke směsím, pro získání optimální hodnoty rozlití, bylo zároveň ovlivněno přítomností pojiv, které navíc při přidání vody do směsi okamžitě reagovali za vzniku hydratačních produktů.

Výrazně hodnotu vlhkosti a rozlití samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, jak můžeme vidět na Obr. 73 a Obr. 74, ovlivňovalo množství vápna. Nejvíce se tento účinek projevil při přidavku vápna k jílu Cl v množství 3,0 % (viz Obr. 74). Vápno mělo tendenci okamžitě reagovat spolu s vodou a jílovými minerály, za vzniku hydratačních produktů, což v některých případech mírně znesnadňovalo promíchávání a samotné rozlití směsi.

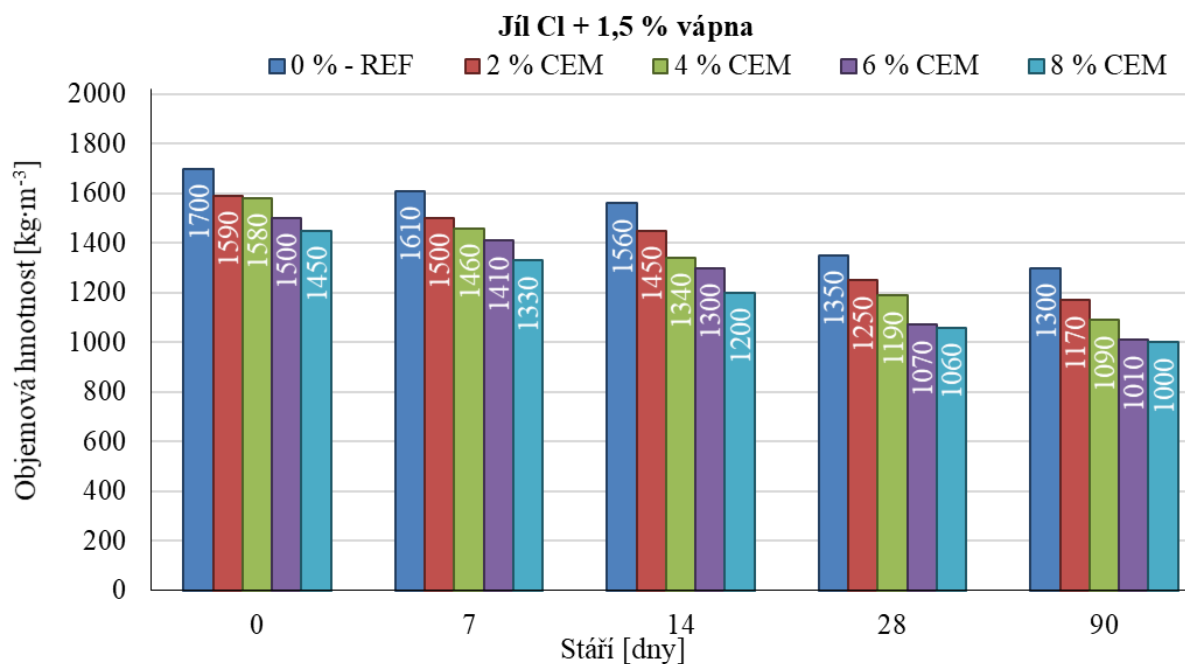
Zvyšující se hodnoty vlhkosti a snižující se hodnoty rozlití byly také ovlivněny zvyšujícím se množstvím cementu. Nejvyšších hodnoty vlhkosti (72 %) potřebné pro získání optimální konzistence (680 mm) tak bylo dosaženo samozhutnitelné zálivky složené z jílu Cl, 3,0 % vápna a 8 % cementu.

V případě návrhu směsi na bázi jílu Cl a pojiv je obecně hodnota rozlití, jež je ovlivněna přítomností jílových minerálů a množstvím vlhkosti ve směsi, jedním z nejdůležitějších parametrů. Množství vody obsažené ve směsi zároveň při postupném odcházení, v průběhu zrání (po 7, 14, 28 a 90 dnech), způsobuje, jak bude uvedeno dále, velké smrštění, což je pro návrh směsi velmi nepříznivé. Tyto nežádoucí jevy by mohly být sníženy např. použitím plastifikačních či ztekucujících přísad ve směsi, které by měly za následek snížení množství vody potřebné pro získání optimální konzistence směsi a zároveň hodnot smrštění. Optimalizace použití plastifikačních a ztekucujících přísad při návrhu samozhutnitelných zálivek je rozebrána ve III. Etapě této disertační práce.

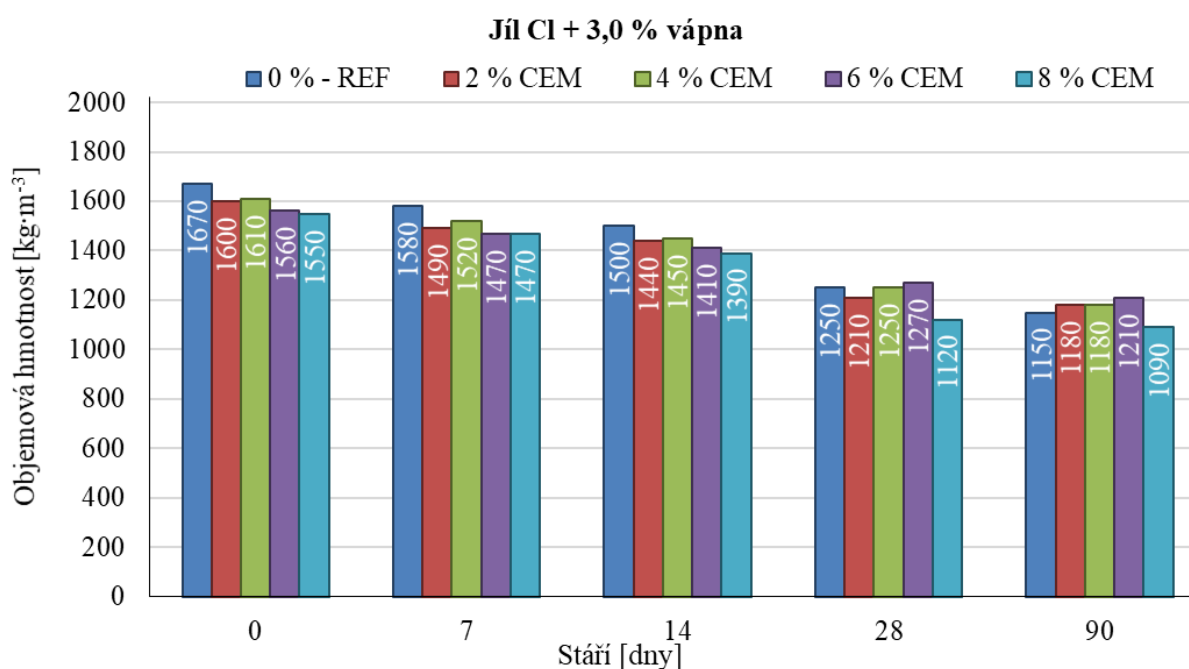
4.2.4.2. Stanovení objemové hmotnosti



Obr. 75. Výsledky objemových hmotností čerstvých a zatvrdlých směsí na bázi jílu Cl a 0 % – 8 % cementu



Obr. 76. Výsledky objemových hmotností čerstvých a zatvrdlých směsí na bázi jílu Cl, 1,5 % vápna a 0 % – 8 % cementu



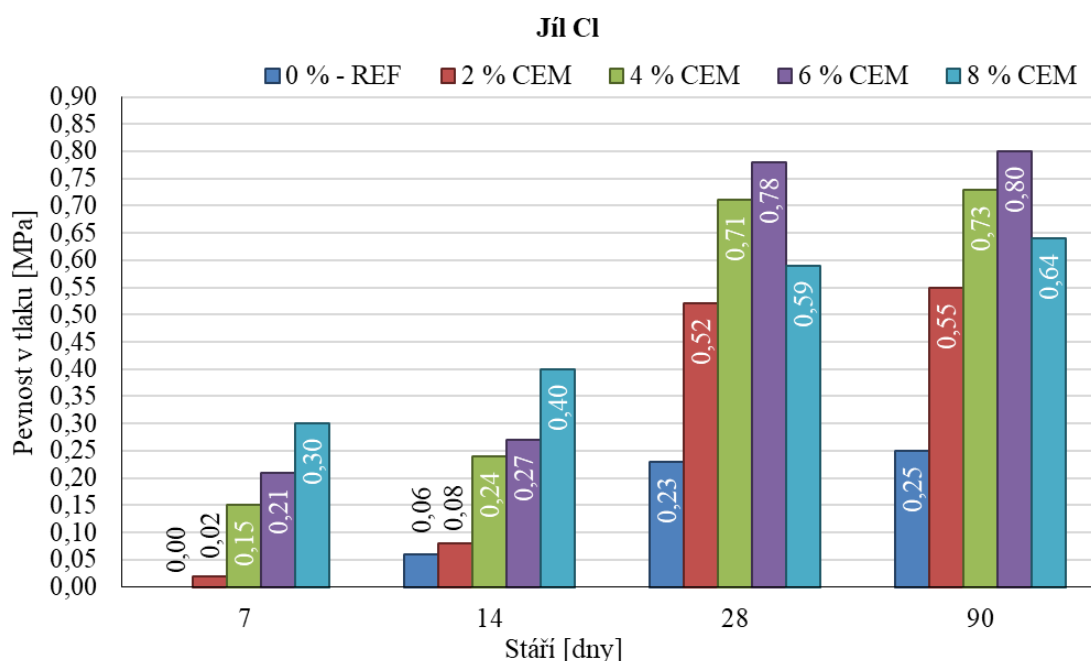
Obr. 77. Výsledky objemových hmotností čerstvých a zatvrdlých směsí na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna a 0 % – 8 % cementu

Na Obr. 75 až Obr. 77 jsou uvedeny hodnoty objemových hmotností samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 0 % – 3,0 % vápna a 0 – 8 % cementu. Na prvním grafu (Obr. 75)

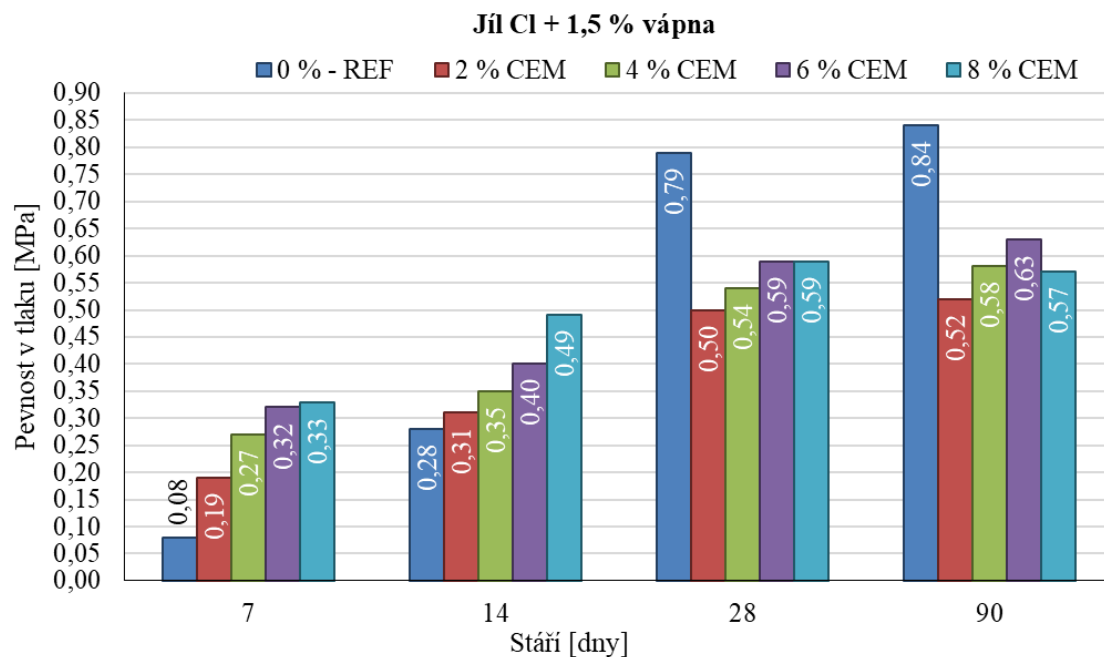
jsou uvedeny hodnoty objemových hmotností zálivek obsahujících pouze cement v množství 0 – 8 %. V dalším grafu Obr. 76 jsou uvedeny výsledky hodnot objemových hmotností zálivek obsahujících kromě cementu (0 – 8 %) navíc 1,5 % vápna. Na Obr. 77 jsou uvedeny hodnoty objemových hmotností zálivek složených z jílu Cl, 0 – 8 % cementu a 3,0 % vápna.

Z grafů Obr. 75 až Obr. 77 je vidět, že se zvyšujícím se množstvím vápna, ovšem pouze do hodnoty 1,5 %, a především zvyšujícím se množstvím cementu docházelo k mírnému snížení objemových hmotností. Tento jev byl způsoben nahrazením primární složky, kterou je zemina právě pojivy, jež spolu se zvyšujícím se množstvím vody snižují objemovou hmotnost směsí. Nejvyšší hodnoty objemové hmotnosti ($1840 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, po 28 dnech zrání) tak bylo dosaženo u zálivky složené pouze z jílu Cl a vody (viz Obr. 75). A nejnižší hodnotu ($1060 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) objemové hmotnosti měla samozhutnitelná zálivka na bázi jílu Cl, 1,5 % vápna a 8 % cementu. Obecně pak docházelo ke snižování objemových hmotností v průběhu času, což bylo způsobeno odcházející vodou ze zálivek po určité době zrání (7, 14, 28 a 90 dnech).

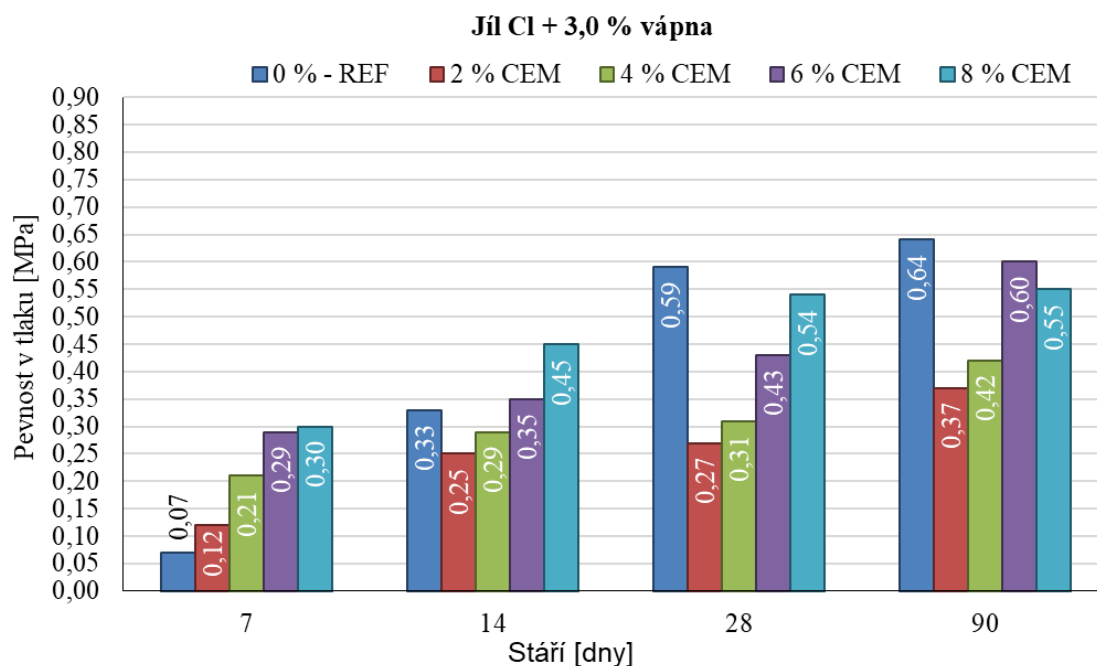
4.2.4.3. Stanovení pevnosti v tlaku



Obr. 78. Hodnoty pevností v tlaku směsí na bázi jílu Cl a 0 % – 8 % cementu



Obr. 79. Hodnoty pevností v tlaku směsí na bázi jílu Cl, 1,5 % vápna a 0 % – 8 % cementu



Obr. 80. Hodnoty pevností v tlaku směsí na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna a 0 % – 8 % cementu

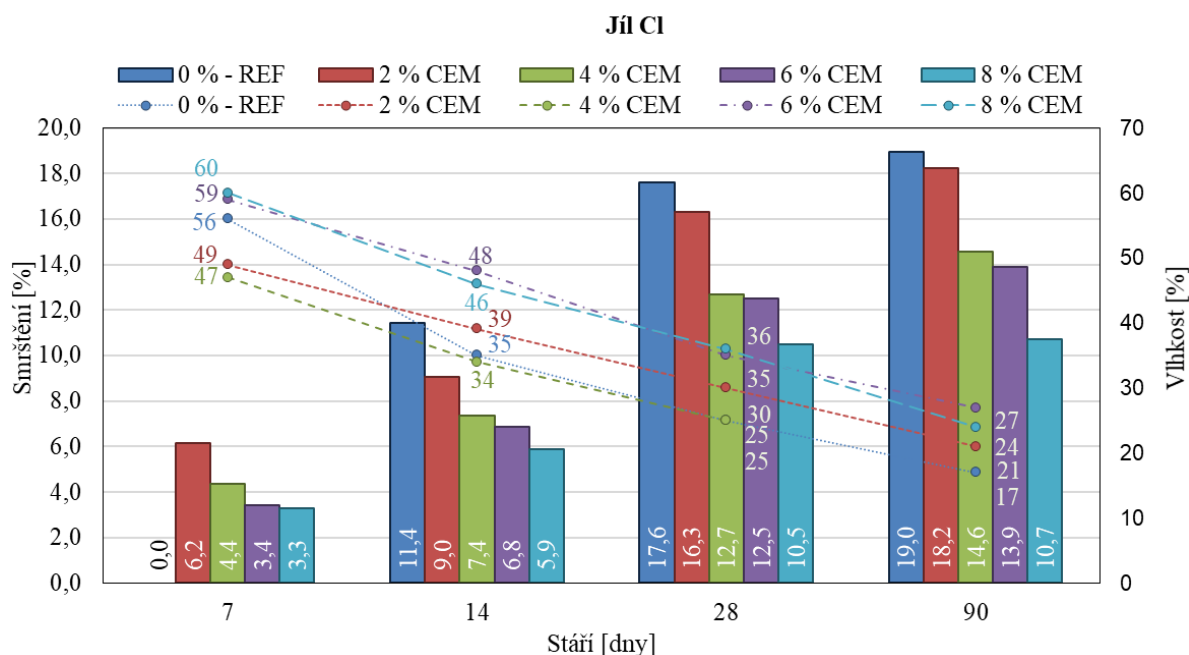
Na Obr. 78 až Obr. 80 jsou uvedeny výsledky pevností v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 0 – 3 % vápna a 0 – 8 % cementu po 7, 14, 28 a 90 dnech zrání. Obr. 78 zobrazuje výsledky pevností v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl

a 0 – 8 % cementu (bez vápna). Na dalším Obr. 79 jsou uvedeny výsledné hodnoty pevností v tlaku zálivek obsahujících kromě cementu (0 – 8 %) navíc 1,5 % vápna. Na Obr. 80 můžeme vidět pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 0 – 8 % cementu a vápna v množství 3,0 %.

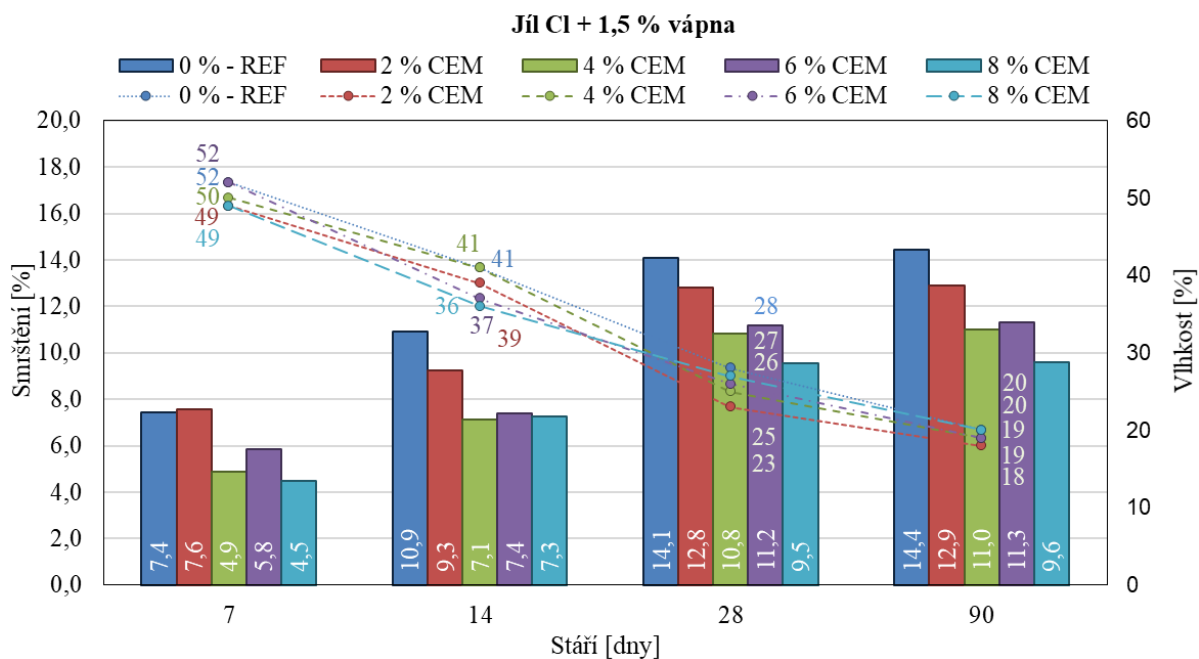
Při srovnání pevností v tlaku dvou předchozích zemin (písčité jíl saCl a písčitá zemina fgrCSa) lze konstatovat, že samozhutnitelné zálivky na bázi Cl, dosahovaly nejvyšších pevností v tlaku. Pevnost v tlaku se navíc ještě zvyšovala se zvyšující se dávkou cementu a vápna (pouze ale v množství 1,5 %). Při použití vápna v k jílu Cl v množství 3,0 %, jak můžeme vidět na Obr. 80, se hodnoty pevnosti v tlaku mírně snižovaly. To bylo způsobeno, stejně jako u písčitého jílu saCl, vytvořením pórovitější struktury v souvislosti s přibývajícím množstvím vápna.

Ke zvyšování pevností v tlaku dále docházelo se zvyšující se dávkou cementu a v průběhu času (po 7, 14, 28 a 90 dnech zrání). Nejvyšší pevnosti v tlaku 0,59 MPa (po 28 dnech zrání) tak bylo dosaženo u směsi samozhutnitelné zálivky složené z jílu Cl, 1,5 % vápna a 6 (8) % cementu. Z hlediska dosažené hodnoty pevnosti v tlaku (0,59 MPa, po 28 dnech zrání) lze tuto samozhutnitelnou zálivku považovat jako nevyhloubitelnou.

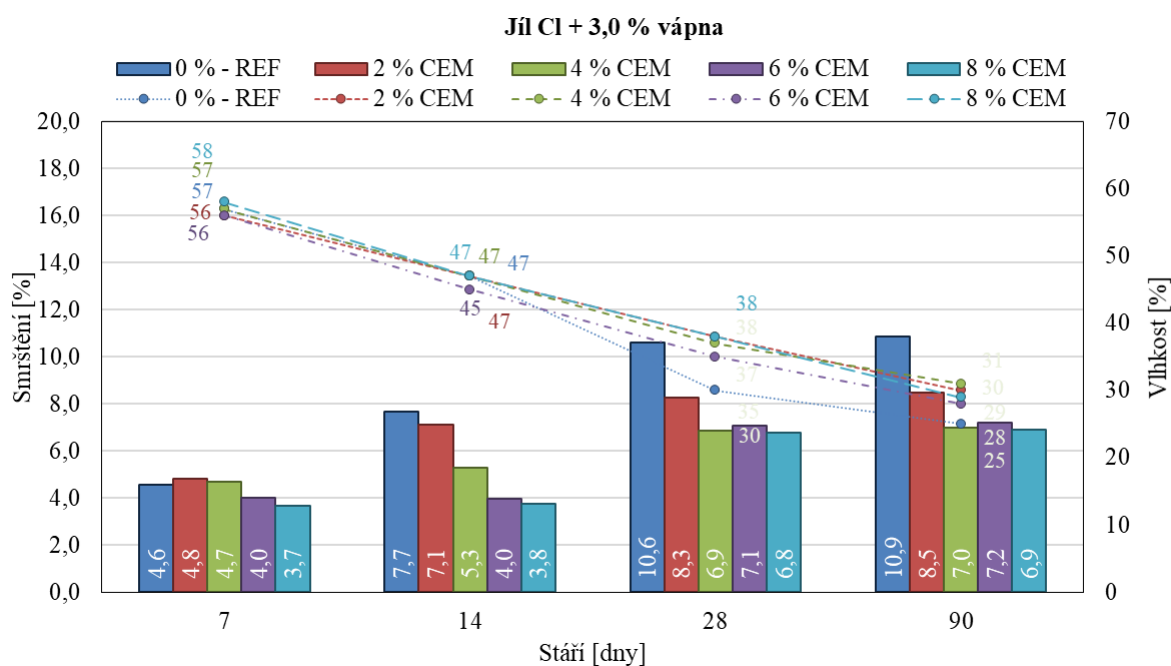
4.2.4.4. Stanovení smrštění a vlhkosti



Obr. 81. Závislost smrštění na vlhkosti směsí na bázi jílu Cl a 0 % – 8 % cementu



Obr. 82. Závislost smrštění na vlhkosti směsí na bázi jílu CI, 1,5 % vápna a 0 % – 8 % cementu



Obr. 83. Závislost smrštění na vlhkosti směsí na bázi jílu CI, 3,0 % vápna a 0 % – 8 % cementu

Na Obr. 81 až Obr. 83 je uvedena závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu CI, 0 % - 3,0 % vápna a 0 % - 8 % cementu. V prvním grafu Obr. 81

je uvedena závislost smrštění na vlhkosti zálivek složených pouze z jílu Cl a 0 – 8 % cementu (bez vápna). Na Obr. 82 jsou zobrazeny výsledky smrštění zálivek obsahujících jak cement, v množství 0 – 8 %, tak vápno, v množství 1,5 %. Na Obr. 83 můžeme vidět výsledné hodnoty smrštění zálivek na bázi jílu Cl, 0 – 8 % cementu a 3,0 % vápna.

Z výsledků hodnot smrštění samozhutnitelných zálivek na bázi Cl, uvedených na Obr. 81 až Obr. 83, lze konstatovat, že ve srovnání s předchozími typy zemin (písčité jíl saCl a písčité zemina fgrCSa) bylo dosaženo nejvyšších hodnot smrštění. Tento fakt byl způsobem tím, že jíl Cl obsahoval nejvyšší množství jemnozrnných (jílovitých) částic ($f = 96,99 \%$), které mají tendenci na sebe vázat velké množství vody. Především pak v případě, kdy zemina obsahuje převážné množství minerálů montmorillonitu.

Při porovnání parametrů smrštění směsí na bázi jílu Cl, z hlediska působení pojiv lze konstatovat, že se hodnoty smrštění snižovaly se zvyšujícím se množstvím vápna, cementu a v průběhu času. Z hlediska působení vápna a cementu na hodnotu smrštění můžeme říci, že oba druhy pojiv (vápno i cement) působily jako účinné stabilizační přísady, díky kterým bylo dosaženo nižších hodnot smrštění. Ovšem i přesto byly tyto hodnoty, ve srovnání s předchozími typy zemin, poměrně vysoké. Nejnížší hodnoty smrštění (6,8 %, po 28 dnech zrání) pak bylo dosaženo u samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna a 8 % cementu (viz Obr. 83). Nejvyšší smrštění (17,6 %, po 28 dnech zrání) bylo naměřeno u zálivky složené pouze z jílu Cl a vody (viz Obr. 81).

Pokud bychom chtěli dosáhnout snížení smrštění jílovitých zemin, doporučilo by se je smíchat např. s jiným typem zemin (např. písčitou), vedlejšími energetickými produkty či přísadami, které by mohly tyto extrémní hodnoty eliminovat. Účinku přísad (plastifikačních a ztekucujících) na jednotlivé typy zemin, bylo rozebráno v Etapě III.

4.2.5 Stanovení dob tuhnutí na vybraných směsích

Zkoušky stanovující počátek a konec tuhnutí mohou být velmi důležité, obzvláště v případě, kdy má zatuhlá samozhutnitelná zálivka přenést zatížení, kterým může být např. zásyp, chodník či jiná pochozí nebo pojízdná konstrukce. Doby tuhnutí samozhutnitelných zálivek souvisí se složením směsi. Především pak s použitým druhem a množstvím cementu, obsahem jemného plniva (kameniva, zeminy, popílku), vody a povětrnostními podmínkami.

V rámci předchozích výzkumných prací II Etapy bylo prokázáno, že pojiva (vápno, cement) mohou významně ovlivnit výsledné vlastnosti samozhutnitelných zálivek. Především při hodnocení nejdůležitějších parametrů, kterým je např. vývoj pevnosti v tlaku v čase. Z dosažených výsledků samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl bylo zjištěno, že pro zlepšení parametrů směsí, jak v čerstvém, tak v zatvrdlém stavu bylo účinné použití 3,0 % vápna a 2 % a 4 % cementu. Na základě výsledných parametrů samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, bylo možné konstatovat, že pro účinnou stabilizaci a vhodnou úpravu bylo optimální použití 1,5 % vápna a 4 % cementu. Při sledování účinku pojiv (vápna a cementu) u samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, bylo zjištěno, že pro dosažení optimálních parametrů zálivek bylo vhodné použití 3,0 % vápna a 2 – 4 % cementu. Vzhledem k dosaženým výsledkům výzkumných prací II Etapy bylo možné provést výběr optimálních samozhutnitelných zálivek, na kterých byla navíc provedena zkouška stanovení počátku a konce tuhnutí. Výsledky stanovení dob tuhnutí na vybraných samozhutnitelných zálivkách jsou uvedeny v následující Tab. 19.

Tab. 19: Počátek a konec tuhnutí samozhutnitelných zálivek

Složení samozhutnitelné zálivky	Počátek tuhnutí [hod]	Konec tuhnutí [hod]
Písčitý jíl saCl, 3,0 % vápna, 2 % cementu	15,75	50,75
Písčitý jíl saCl, 3,0 % vápna, 4 % cementu	12,25	48,75
Písčitá zemina fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % cementu	9,25	41,25
Jíl Cl, 3,0 % vápna, 2 % cementu	22,50	57,50
Jíl Cl, 3,0 % vápna, 4 % cementu	21,00	53,75

Jak můžeme vidět z Tab. 19 doby tuhnutí samozhutnitelných zálivek souvisely s množstvím přidaných pojiv (především cementu) a vody. Experimentálně bylo stanoveno, že se zvyšující se dávkou cementu docházelo ke snížení počátku a konce tuhnutí. Zároveň byl počátek a konec tuhnutí ovlivněn množstvím vody, které bylo k samozhutnitelným zálivkám přidáno již v čerstvém stavu, pro dosažení optimálního rozlití. Množství přidané vody v zálivkách souviselo s obsahem jemnozrnných jílovitých částic zemin. Dávka vody se tedy zvyšovala především u samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl a jílu Cl, ve srovnání se samozhutnitelnými zálivkami na bázi písčitého jílu saCl.

Nejkratší doba počátku (9,25 hod) a konce (41,25 hod) tuhnutí byla naměřena u samozhutnitelné zálivky na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna a 4 % cementu. Zvýšení doby počátku (15, 75 hod – 2 % cementu; 12,25 hod – 4 % cementu) a konce (50, 75 hod – 2 % cementu; 48,75 hod – 4 % cementu) tuhnutí bylo zaznamenáno

u samozhutnitelné zálivky na bázi písčitého jílu saCl, obsahující 3,0 % vápna a 2 – 4 % cementu. Písčitý jíl saCl, ve srovnání s předchozí zeminou (fgrCSa) obsahoval větší množství jemnozrnných jílovitých částic, které měli tendenci na sebe vázat větší množství vody, které i přes hydratační procesy ze směsi odcházelo pomalu (za normálních laboratorních podmínek 20 ± 2 °C, relativní vlhkosti 50 – 60 %) a tím se zvyšovaly i doby tuhnutí. Nejdelších dob počátku (22, 50 hod – 2 % cementu; 21,00 hod – 4 % cementu) a konce (57, 50 hod – 2 % cementu; 53,75 hod – 4 % cementu) tuhnutí bylo zaznamenáno u samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna a 2 – 4 % cementu. Tento jev se očekával především díky tomu, že samozhutnitelné zálivky obsahovaly nejvyšší podíl jemnozrnných jílovitých částic a tím i množství vody potřebné pro získání optimálního rozlití.

Pro zlepšení parametrů tuhnutí by bylo vhodné při návrhu samozhutnitelných zálivek použití přísad či příměsí, které by snížily množství vody, čímž by se dosáhlo i zkrácení dob tuhnutí. Vhodné se jeví např. použití plastifikačních či ztekucujících přísad, případně alternativních surovin. Ověřením účinku těchto přísad a příměsí se věnovala III Etapa této disertační práce.

4.2.6 Stanovení RTG difrakční analýzy na vybraných směsích

Rentgenová difrakční analýza (RTG) byla použita pro stanovení mineralogického složení nejen zemin, jak bylo uvedeno výše, ale i vybraných samozhutnitelných zálivek. Výběr samozhutnitelných zálivek byl proveden s ohledem na předchozí výzkumné práce, týkající se stabilizace. RTG difrakční analýza byla zaměřena především na zjištění mineralogického složení samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl spolu s pojivy. U těchto druhů zálivek se ve srovnání s ostatními (na bázi písčitého jílu saCl, písčité zeminy fgrCSa) předpokládal, z hlediska stabilizace, největší vliv pojiv. Proto byly vybrány právě na tyto zálivky. Experimentální činnost byla při hodnocení RTG difrakční analýzy zaměřena především na vznik novotvarů podílejících se na vývoji pevnosti v tlaku, počátku a konce tuhnutí apod. Vybrané samozhutnitelné zálivky, na kterých byla provedena RTG difrakční analýza, jsou uvedeny v Tab. 20. RTG difrakční analýza byla prováděna na vybraných samozhutnitelných zálivkách po 7 dnech zrání. Průběh RTG difrakční analýzy probíhal (na základě výpočtu z tučně vytištěných hodnot Step Size [°2Th.] 0,0130 Scan Step Time [s], 157,8450; celkem cca 250 kroků) cca 60 minut. Záznamy (rentgenogramy) z RTG difrakční analýzy vybraných samozhutnitelných zálivek jsou uvedeny v Příloze č. 4 až 13.

Tab. 20: Vybrané samozhutnitelné zálivky pro RTG difrakční analýzu

Složení samozhutnitelné zálivky	Číslo přílohy záznamu RTG difrakční analýzy
Jíl Cl, 1,5 % vápna	Příloha č. 4
Jíl Cl, 4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	Příloha č. 5
Jíl Cl, 8 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	Příloha č. 6
Jíl Cl, 1,5 % vápna, 4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	Příloha č. 7
Jíl Cl, 1,5 % vápna, 8 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	Příloha č. 8
Jíl Cl, 3,0 % vápna	Příloha č. 9
Jíl Cl, 3,0 % vápna, 2 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	Příloha č. 10
Jíl Cl, 3,0 % vápna, 4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	Příloha č. 11
Jíl Cl, 3,0 % vápna, 6 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	Příloha č. 12
Jíl Cl, 3,0 % vápna, 8 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	Příloha č. 13

Z rentgenogramů jednotlivých samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl (viz Příloha č. 4 až 13) bylo zjištěno, že se tyto druhy zálivek skládají především z následujících minerálů: křemen (SiO_2), kalcit (CaCO_3), kaolinit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), illit ($\text{nK}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot \text{nH}_2\text{O}$), montmorillonit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{nH}_2\text{O}$), muskovit ($\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), biotit ($\text{K}_2(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Mn})\text{O} \cdot \text{Al}(\text{Fe})_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), albit ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$) a ortoklas ($\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$). Na vybraných směsích, obsahujících především pojiva, bylo možné zároveň zaznamenat portlandit, přesněji kolem píku 18,1 (úhel 2Θ [°]). Na základě pořízených rentgenogramů ovšem nebylo zcela zřejmé tento minerál identifikovat. Proto byla jako doplňující zvolena DTA analýza. Při porovnání jednotlivých píků bylo zjištěno, že se jejich intenzita a různorodost, u jednotlivých druhů zálivek, výrazně nelišila. Experimentálně bylo stanoveno, že převažujícími byly minerály reprezentující zeminu (křemen, kaolinit, illit, slídy, kalcit, ortoklas a albit), spíše než vzniklé novotvary, které se předpokládaly reakcí pojiv se zeminou. Z hlediska intenzity píků lze konstatovat, že po delší době zrání zálivek by mohla být vyšší, k výrazným změnám by ovšem nedošlo.

Na základě dosažených výsledků mineralogického složení samozhutnitelných zálivek bylo možné předběžně navrhnout plastifikační, a především ztekucující přísady, které by měly vliv na ztekucení zálivek. Vzhledem k mineralogickému složení bylo vhodné ověřit účinek následujících druhů plastifikačních přísad: Sika ViscoCrete – 21, Sika ViscoCrete – 4088, Sika ViscoCrete – 1062 a ztekucujících přísad: hexametafosfát sodný, tripolyfosfát sodný, uhličitan sodný. U samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl se předpokládal především účinek se ztekucujícími přísadami než s plastifikačními,

kteří ochotněji reagují spíše s cementem. Ověření účinku jednotlivých druhů přísad spolu s jílovými minerály bylo předmětem III Etapy této disertační práce.

Pro zjištění množství vzniklých novotvarů samozhutnitelných zálivek na bázi jílu CI byla jako doplňující provedena DTA analýza.

4.2.7 Stanovení DTA analýzy na vybraných směsích

DTA analýza byla provedena jako doplňující, k RTG difrakční analýze, za účelem zjištění množství vzniklých novotvarů u vybraných samozhutnitelných zálivek. Vybrané druhy zálivek jsou uvedeny v Tab. 21. Na těchto zálivkách byla provedena DTA analýza, stejně jako u předchozí RTG difrakční analýzy, po 7 dnech zrání vzorků. Výsledky DTA a TG (termogravimetrických) křivek vybraných samozhutnitelných zálivek jsou uvedeny v Přílohách č. 14 až 23.

Tab. 21: Vybrané samozhutnitelné zálivky pro DTA analýzu

Složení samozhutnitelné zálivky	Číslo přílohy
Jíl CI, 1,5 % vápna	Příloha č. 14
Jíl CI, 4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	Příloha č. 15
Jíl CI, 8 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	Příloha č. 16
Jíl CI, 1,5 % vápna, 4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	Příloha č. 17
Jíl CI, 1,5 % vápna, 8 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	Příloha č. 18
Jíl CI, 3,0 % vápna	Příloha č. 19
Jíl CI, 3,0 % vápna, 2 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	Příloha č. 20
Jíl CI, 3,0 % vápna, 4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	Příloha č. 21
Jíl CI, 3,0 % vápna, 6 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	Příloha č. 22
Jíl CI, 3,0 % vápna, 8 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	Příloha č. 23

Z RTG difrakční analýzy bylo zjištěno, že samozhutnitelné zálivky obsahují novotvary (především CaCO_3), které mohou mít vliv na vývoj pevnosti v tlaku, počátek a konec tuhnutí atd. Pro ovlivnění těchto parametrů je ovšem důležité znát jejich množství, na základě čehož lze následně usuzovat, jak velký účinek mohou mít tyto novotvary na výsledné vlastnosti samozhutnitelných zálivek. Z DTA a TG křivky, a na základě předchozí RTG difrakční analýzy, se jednalo o novotvary, kterými byl portlandit (Ca(OH)_2) a kalcit (CaCO_3). Na základě získaných hodnot z DTA a TG křivky bylo zjištěno, že množství těchto novotvarů souviselo především s obsahem pojiv, které byly k samozhutnitelným zálivkám přidány. Pro zjištění množství těchto novotvarů byl použit výpočet, kterým se zjistilo jejich hmotnostní a procentuální zastoupení v samozhutnitelné zálivce. V následujícím textu je uveden postup výpočtu pro první

samozhutnitelnou zálivku (viz také rentgenogram uvedený v Příloze č. 14). Výsledné hodnoty množství portlanditu a kalcitu (z celkové navážky) v jednotlivých zálivkách jsou uvedeny v Tab. 22.

Postup výpočtu:

Celková ztráta žiháním (zž) zkoušené samozhutnitelné zálivky se vypočítala z křivky TG, z níž se odečetla hmotnost vzorku na konci zkoušky – ztráta hmotnosti činila 12,0613 mg. Původní navážka byla 76,5340 mg. Celková ztráta žiháním tedy byla:

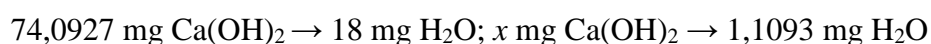
$$zž = 100 - \left(\frac{76,5340 - 12,0613}{76,5340} \cdot 100 \right) = 15,76 \%$$

Obsah Ca(OH)₂ bylo možné zjistit podle následujícího postupu:

Při dehydroxylaci Ca(OH)₂ odešlo 1,1093 mg – odečteno z TG křivky v teplotním intervalu 460 – 560 °C, kdy podle křivky DTA došlo k dehydroxylaci Ca(OH)₂:



Z molárních hmotností jednotlivých členů chemické rovnice víme, že ze 74,0927 g Ca(OH)₂ odejde 18 g vody. Známe navážku posuzované zeminy (76,5340 mg) a odečetli jsme množství H₂O, které odešlo při dehydroxylaci Ca(OH)₂ (1,1093 mg). Potom bylo třeba vypočítat, kolik Ca(OH)₂ odpovídá odečtené ztrátě žiháním v příslušném teplotním intervalu 460 – 560 °C.

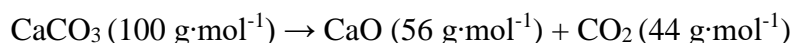


$$x = \frac{74,0927 \cdot 1,1093}{18} = 4,6 \text{ mg}$$

Výpočtem bylo možné zjistit, že obsah Ca(OH)₂ v samozhutnitelné zálivce činil 4,6 mg, což vzhledem k navážce činí cca 6,0 %.

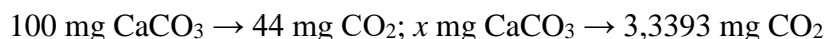
Obsah CaCO₃ bylo možné zjistit podle následujícího postupu:

Při dekarbonataci CaCO₃ odešlo 3,3393 mg – odečteno z TG křivky v teplotním intervalu 770 – 890 °C, kdy podle křivky DTA došlo k dekarbonataci CaCO₃:



Z molárních hmotností jednotlivých členů chemické rovnice víme, že ze 100 g CaCO₃ odejde 44 g oxidu uhličitého. Známe navážku posuzované zeminy (76,5340 mg) a odečetli jsme množství CO₂, které odešlo při dekarbonataci CaCO₃ (3,3393 mg).

Potom bylo třeba vypočítat, kolik CaCO_3 odpovídá odečtené ztrátě žháním v příslušném teplotním intervalu 770 – 890 °C.



$$x = \frac{100 \cdot 3,3393}{44} = 7,6 \text{ mg}$$

Výpočtem bylo možné zjistit, že obsah CaCO_3 v samozhutnitelné zálivce činil 7,6 mg, což vzhledem k navážce činí cca 9,9 %.

Tab. 22: Výsledné hodnoty množství C-S-H, portlanditu a kalcitu v samozhutnitelné zálivce

Složení samozhutnitelné zálivky	Množství Ca(OH)_2		Množství CaCO_3	
	[mg]	[%]	[mg]	[%]
Jíl Cl, 1,5 % vápna	4,6	6,0	7,6	9,9
Jíl Cl, 4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	4,2	5,5	8,0	10,6
Jíl Cl, 8 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	3,7	5,4	7,3	10,5
Jíl Cl, 1,5 % vápna, 4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	4,5	6,1	7,4	9,9
Jíl Cl, 1,5 % vápna, 8 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	4,2	5,9	7,2	10,1
Jíl Cl, 3,0 % vápna	4,0	5,4	7,0	9,4
Jíl Cl, 3,0 % vápna, 2 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	4,0	5,1	7,7	9,8
Jíl Cl, 3,0 % vápna, 4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	3,9	5,2	7,4	9,6
Jíl Cl, 3,0 % vápna, 6 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	3,5	4,6	7,6	10,0
Jíl Cl, 3,0 % vápna, 8 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	3,4	4,4	7,9	10,3

Z dosažených výsledků lze konstatovat, že ve srovnání s Ca(OH)_2 měl v samozhutnitelných zálivkách větší zastoupení CaCO_3 . Množství CaCO_3 bylo ovlivněno jak mineralogickým složením jílu Cl, tak především množstvím cementu obsaženým v samozhutnitelné zálivce. Se zvyšujícím se obsahem cementu docházelo ke zvyšování hodnoty CaCO_3 . Tento parametr byl naopak snižován přítomností vápna. Stejný účinek pojiv (vápna, cementu) byl zaznamenán i u vývoje pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek. Z DTA analýzy bylo zároveň orientačně stanoveno množství C-S-H gelů, které vycházelo do 20 % (z celkové navážky). Na základě dosažených výsledků lze konstatovat, že pojiva ochotně reagovaly s jílem Cl za vzniku hydratačních produktů, které byly navíc ovlivněny druhem a množstvím pojiv.

4.2.8 Mikroskopická analýza vybraných samozhutnitelných zálivek

Samozhutnitelné zálivky, jakožto součást výplňového materiálu prostor inženýrských sítí, svými parametry rozhodují o vlastnostech, použitelnosti, aplikovatelnosti a v podstatě

kvalitě konstrukce celé stavby. Výsledné parametry samozhutnitelných zálivek jsou ovlivněny právě jejich strukturou, která může být hodnocena jak z pohledu makrostruktury, tak z pohledu mikrostruktury. Snahou výzkumných prací disertace proto bylo zjistit vliv struktury vybraných samozhutnitelných zálivek na jejich výsledné vlastnosti. Makrostrukturu samozhutnitelných zálivek bylo možné rozlišit pouhým okem, případně za použití optického mikroskopu při malém zvětšení. Pro zjištění mikrostruktury bylo nutné použití, jak již bylo zmíněno výše RTG difrakční analýzy a DTA analýzy, které byly dále doplněny o mikroskopickou analýzu, pomocí níž bylo možné rozlišit částice v rozmezí μm . Mikroskopická analýza byla na vybraných samozhutnitelných zálivkách prováděna po 7 dnech zrání. Vybrané druhy samozhutnitelných zálivek jsou uvedeny v Tab. 23. Snímky vybraných samozhutnitelných zálivek pořízené optickou mikroskopickou analýzou jsou uvedeny v Příloze č. 24 a) až j).

Tab. 23: Optická mikroskopie vybraných samozhutnitelných zálivek

Složení samozhutnitelné zálivky	Číslo přílohy
Jíl Cl, 1,5 % vápna	Příloha č. 24 a)
Jíl Cl, 4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	Příloha č. 24 b)
Jíl Cl, 8 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	Příloha č. 24 c)
Jíl Cl, 1,5 % vápna, 4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	Příloha č. 24 d)
Jíl Cl, 1,5 % vápna, 8 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	Příloha č. 24 e)
Jíl Cl, 3,0 % vápna	Příloha č. 24 f)
Jíl Cl, 3,0 % vápna, 2 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	Příloha č. 24 g)
Jíl Cl, 3,0 % vápna, 4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	Příloha č. 24 h)
Jíl Cl, 3,0 % vápna, 6 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	Příloha č. 24 i)
Jíl Cl, 3,0 % vápna, 8 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	Příloha č. 24 j)

Dle způsobu uspořádání struktury samozhutnitelných zálivek bylo zjištěno, že se jedná o heterogenní dispersní materiál, složený z různých druhů minerálů (s ohledem na daný typ zeminy), organických příměsí, pojiv, vody atd. Na základě provedené mikroskopické analýzy bylo možné konstatovat, že hlavní stavební jednotkou samozhutnitelných zálivek byly hrubě dispersní látky (částice od 1 mm do 10^{-3} mm). V případě samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl bylo možné pomocí mikroskopické analýzy rozeznat křemičité složky (SiO_2) a především muskovit (slídy). Ostatní viditelné mineralogické částice, šlo sice mikroskopickou analýzou laicky identifikovat, ale pro přesné stanovení bylo vhodné vycházet z RTG difrakční analýzy. Z mikroskopického pozorování bylo zároveň u samozhutnitelných zálivek zaznamenáno minoritní množství organických částic, které byly součástí jílu Cl. Póry, dutiny či jiné defekty u samozhutnitelných zálivek nebyly zaznamenány.

Kromě mikroskopické analýzy, provedené pomocí optického mikroskopu, byla zároveň u vybraných zálivek provedena rastrovací elektronová mikroskopie (viz Tab. 24). Na základě provedené analýzy zálivek bylo zaznamenáno, že vyšší množství vápna (3,0 %) způsobovalo přeměnu vrstevnaté struktury zeminy, která je typická pro jílové minerály na strukturu zrnitou. Zároveň se u těchto zálivek projevovalo mírné zvýšení pórovitost. Vznik pórovitější struktury byl způsoben restrukturalizací záporně nabitých jílovitých částic, které byly obklopeny kladně nabitým kationtovým obalem. Zpočátku byly totiž částice jílu rozptýleny a vyskytovalo se u nich paralelní uspořádání. Kvůli jejich negativnímu povrchovému náboji a kladně nabitým kationtovým obalům ovšem následně docházelo k tomu, že se částice navzájem mírně odpuzovaly. Tento jev byl ovšem překonán následnými pucolánovými reakcemi, které vedly především ke zvýšení pevností v tlaku a snížení smrštění samozhutnitelných zálivek. Na základě mikroskopické analýzy byl mechanismus pucolánové reakce zaznamenán transportem hydroxidu vápenatého pomocí vody a spojením s hlinitanovými a/nebo silikátovými jílovými minerály. Výsledkem byl vznik „cementových produktů“ obsahujících hydráty křemičitanů a hlinitanů vápenatých. Obecně lze říci, že jakékoliv rozpuštěné vápenaté ionty Ca^{2+} uvnitř zeminy pak reagovaly s jakýmkoliv rozpuštěným SiO_2 a Al_2O_3 z jílovitých minerálů za vzniku hydratovaných C-S-H a C-A-H gelů. Kromě vápna byl k zálivkám zároveň přidán cement. Přídavek cementu k zálivkám byl pomocí elektronové rastrovací mikroskopie pozorován především vznikem hydratačních produktů (C-S-H a C-A-H gelů), které stejně jako u vápna vznikaly reakcí vápenatých iontů Ca^{2+} spolu s rozpuštěným SiO_2 a Al_2O_3 z jílovitých minerálů. U zálivek obsahujících částice cementu bylo během hydratace (procesu vytvrzování) zároveň zaznamenáno, že vytvářely mezi sousedními cementovými zrny a částicemi zeminy vazby, které se postupem času vytvrzovaly za vzniku pevnější struktury. Snímky vybraných samozhutnitelných zálivek pořízené rastrovací elektronovou mikroskopií jsou uvedeny v Příloze č. 25 a) až d).

Tab. 24: Rastrovací elektronová mikroskopie vybraných samozhutnitelných zálivek

Složení samozhutnitelné zálivky	Číslo přílohy
Jíl Cl	
Jíl Cl, 1,5 % vápna	Příloha č. 25 a)
Jíl Cl, 4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	Příloha č. 25 b)
Jíl Cl, 1,5 % vápna, 4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	Příloha č. 25 c)
Jíl Cl, 3,0 % vápna, 4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	Příloha č. 25 d)

Experimentálně bylo pomocí mikroskopické analýzy stanoveno, že samozhutnitelné zálivky vytváří kompaktní systém, který díky obsahu jednotlivých složek zajišťuje předpoklad pro vhodnou aplikovatelnost a použitelnost ve stavebních konstrukcích.

Shrnutí

Experimentálně bylo v II Etapě stanoveno, že pojiva (vápno, cement) mohou významně ovlivnit výsledné vlastnosti samozhutnitelných zálivek. Především při hodnocení nejdůležitějších parametrů, kterými jsou rozlití, pevnost v tlaku a smrštění. Použitím těchto druhů pojiv, bylo u samozhutnitelných zálivek dosaženo požadovaných hodnot rozlití (SF2 - 660 mm až 750 mm), pevností v tlaku větších jak 0,14 MPa po třech dnech zrání a větší jak 0,2 MPa po 28 dnech zrání (pro vyhloubitelné zálivky) a snížení smrštění.

Z dosažených výsledků samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 1,5 % - 3,0 %, 0 – 8 % cementu bylo zjištěno, že pro zlepšení parametrů směsí, jak v čerstvém, tak v zatvrdlém stavu je účinné použití 3,0 % vápna a 2 % a 4 % cementu k danému písčitému jílu saCl. Při porovnání účinku vápna a cementu lze konstatovat, že ochotněji s písčítým jílem saCl reagovalo vápno, konkrétně v množství 3,0 %. Na rozdíl od cementu totiž vápno atakuje jílovité minerály, čímž dochází k chemickým reakcím, které vedou např. k lepší stabilizaci (snížení smrštění). Pro zvýšení pevnosti v tlaku a zároveň pro stabilizaci směsí se účinně projevila přítomnost cementu, který ovšem spíše reagoval s přítomnou vlhkostí, než s jílovými minerály, za vzniku hydratačních produktů. S ohledem na výše uvedené výsledky byly dále používány již vybrané receptury (jílovitá zemina saCl, 3,0 % vápna a 2 – 4 % cementu), na kterých byly ověřovány další druhy přísad.

Na základě výsledných parametrů samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, především pak hodnoty rozlití, pevnosti v tlaku a smrštění, lze konstatovat, že pro účinnou stabilizaci a vhodnou úpravu bylo optimální použití 1,5 % vápna a 4 % cementu. Vzhledem k povaze samouzhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa můžeme říci, že větší vliv na pevnosti v tlaku měl přídavek cementu než přídavek vápna. Vápno totiž ochotněji reagovalo s jílovými minerály, jak bylo uvedeno u předchozí zeminy saCl, kdežto cement lépe reagoval s křemičitými složkami, jak tomu bylo o písčité zeminy fgrCSa. S ohledem na výše uvedené výsledky byly dále používány již vybrané receptury samozhutnitelných zálivek složených z písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna a 4 % cementu, na kterých byly ověřovány další druhy přísad.

Při sledování účinku pojiv (vápna a cementu) u samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, bylo zjištěno, že pro dosažení optimálních parametrů zálivek je vhodné použití 3,0 % vápna a 2 – 4 % cementu. Vápno ochotně reagovalo spolu s jílovými minerály, obsaženými v jílu Cl, což se projevilo především zlepšením stabilizace směsi (snížením smrštění). Cement s jílem a vodou ochotně reagoval za vzniku hydratačních produktů, které měli vliv na zvýšení hodnot pevností v tlaku a snížení smrštění. Jak vápno, tak cement se v případě účinku na samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl projevily jako vhodné stabilizační přísady. Pro dosažení optimálních vlastností samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl bylo tedy vhodné použití 3,0 % vápna a 2 – 4 % cementu. Takto navržené receptury jsou proto dále používány a ověřovány v následujícím textu.

Na vybraných samozhutnitelných zálivkách bylo zároveň provedeno stanovení dob tuhnutí, jakožto parametrů důležitých především v případě, kdy má zatuhlá samozhutnitelná zálivka přenést zatížení, kterým může být např. zásyp, chodník či jiná pochozí nebo pojízdná konstrukce. Na základě experimentálního stanovení bylo zjištěno, že počátek a doba tuhnutí souvisí především s mineralogickým složením zemin, množstvím použitého druhu pojiv a množstvím vody, které se k zálivkám přidávalo v čerstvém stavu pro dosažení optimálního rozlití. Nejkratší doba počátku (9,25 hod) a konce (41,25 hod) tuhnutí byla naměřena u samozhutnitelné zálivky na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna a 4 % cementu. Zvýšení doby počátku (15, 75 hod – 2 % cementu; 12,25 hod – 4 % cementu) a konce (50, 75 hod – 2 % cementu; 48,75 hod – 4 % cementu) tuhnutí bylo zaznamenáno u samozhutnitelné zálivky na bázi písčitého jílu saCl, obsahující 3,0 % vápna a 2 – 4 % cementu. Nejdelsích dob počátku (22, 50 hod – 2 % cementu; 21,00 hod – 4 % cementu) a konce (57, 50 hod – 2 % cementu; 53,75 hod – 4 % cementu) tuhnutí bylo zaznamenáno u samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna a 2 – 4 % cementu. Pro zlepšení parametrů tuhnutí by bylo vhodné při návrhu samozhutnitelných zálivek použití přísad či příměsí, které by snížily množství vody, čímž by se dosáhlo i zkrácení dob tuhnutí.

Pro zjištění mikrostruktury samozhutnitelných zálivek byla zároveň, v rámci výzkumných prací disertace, provedena RTG difrakční analýzy, DTA analýzy a mikroskopická analýza. Experimentálně bylo pomocí analýz stanoveno, že samozhutnitelné zálivky vytváří kompaktní systém, který díky obsahu jednotlivých složek zajišťuje předpoklad pro vhodnou aplikovatelnost a použitelnost ve stavebních konstrukcích.

I přes to, že výše uvedené, vybrané samozhutnitelné zálivky splňují normové požadavky a předpoklady, pro to, aby mohly být použity v konstrukci, bylo snahou dalších výzkumných prací této disertace dosažení ještě lepších vlastností zálivek (především snížení vlhkosti, zvýšení rozlité, pevnosti v tlaku a snížení smrštění) za pomoci použití přísad. V rámci III Etapy byl proto ověřován vliv vybraných plastifikačních a ztekucujících přísad s vybranými samozhutnitelnými zálivkami.

4.3 Etapa III - Sledování vlivu dalších druhů přísad a příměsí při návrhu samozhutnitelných zálivek

Z předchozích výzkumných prací disertace bylo zjištěno, že vhodnou volbou a množstvím pojiv, k danému typu zemin, spolu s přidavkem vody, lze získat samozhutnitelnou zálivku, která svými parametry umožňuje její použití v konstrukci. Nutné je zde poznamenat, že ztekucení samozhutnitelných zálivek bylo dosaženo pouze pomocí vody, což se především u zálivek na bázi jílu Cl projevilo jejím vysokým podílem, které mělo následně největší vliv na zvýšení hodnoty smrštění. V ostatních případech samozhutnitelných zálivek (na bázi písčitého jílu saCl, a písčité zeminy fgrCSa) bylo množství vody sníženo, díky nižšímu obsahu jemnozrnných jílovitých částic, ale i tak se její přídavek projevil na výsledných hodnotách. Snahou a jedním z cílů práce proto bylo objasnění vlivu synergického působení ztekucujících či plastifikačních přísad s minerály obsaženými v různých typech zemin, které mohou vést k redukci vody a tím i ke zlepšení dalších parametrů zálivek.

V případě ztekucení samozhutnitelných zálivek na bázi zemin (písčitého jílu saCl, písčité zeminy fgrCSa a jílu Cl) bylo nezbytné zmínit, že se jednalo o zcela novou technologii úpravy zemin, která není v nynější praxi zcela známa a v zahraničí je používána pouze výjimečně či jako tzv. „know how“. V běžné praxi jsou známy technologie, které umožňují využití vedlejších energetických produktů, alternativních surovin, křemičitých písků atd., spolu v kombinaci s pojivy, jež vedou ke vzniku určitých druhů samozhutnitelných zálivek, ovšem z hlediska využití zemin a dále pak plastifikačních či ztekucujících přísad, je tato technologie unikátní.

4.3.1 Laboratorní testování a výběr dispergačních činidel

Jak již bylo zmíněno výše, pro snížení množství vody a zlepšení reologických vlastností bylo pro návrh samozhutnitelných zálivek zvoleno použití plastifikačních a ztekucujících přísad. Výběr plastifikačních a ztekucujících přísad byl proveden s ohledem na povahu materiálu, kterým jsou právě samozhutnitelné zálivky na bázi zemin a na základě doporučení od výrobců. Vzhledem k tomu, že samozhutnitelné zálivky patří mezi tzv. „hybridní materiál“, který nelze posuzovat ani jako beton, ani jako zhutněnou zeminu či jinou cementovou zálivku, byl výběr vhodných plastifikačních a ztekucujících přísad proveden s ohledem na daný typ zeminy. Pro návrh samozhutnitelných zálivek byly použity následující druhy přísad: *plastifikační přísady* - Sika ViscoCrete 21, Sika ViscoCrete 4088 a Sika ViscoCrete 1062, v množství 1 %, 2 % a 3 % (z hmotnosti cementu)

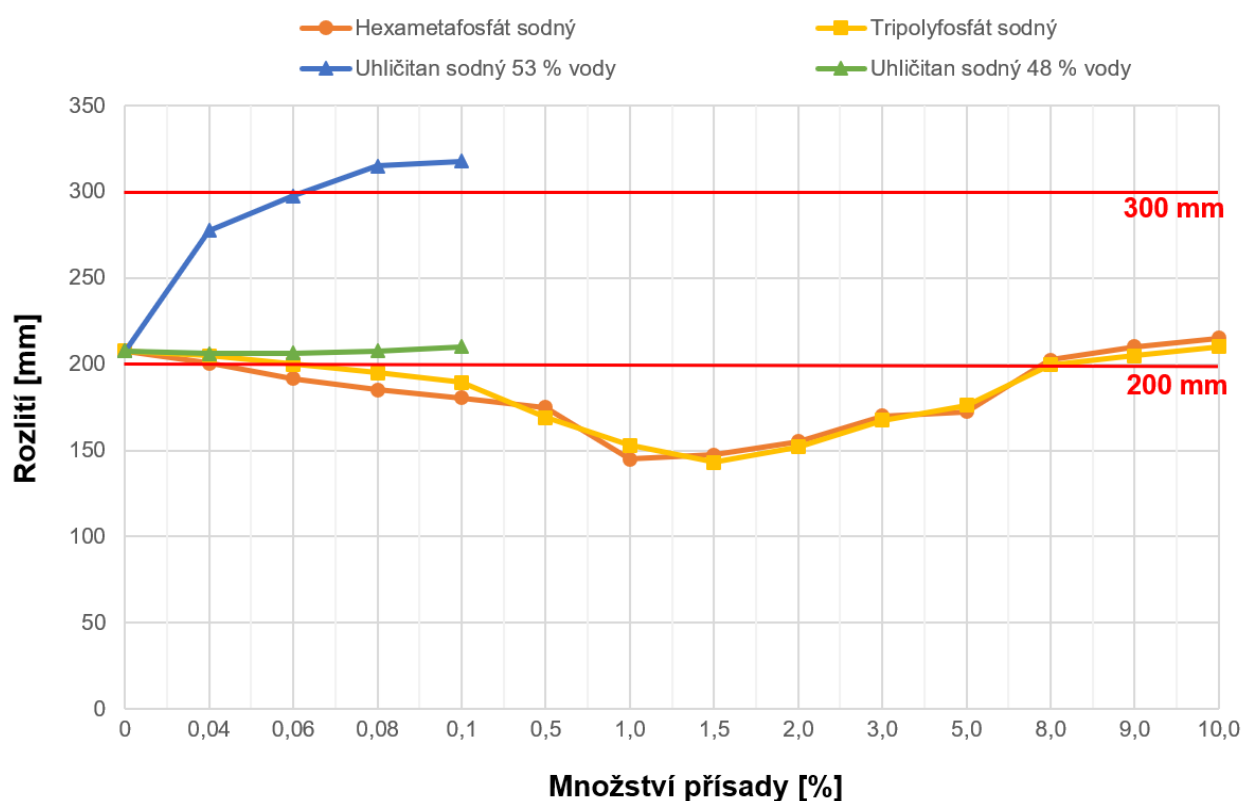
a ztekucující přísady - hexametafosfát sodný, tripolyfosfát sodný a uhličitan sodný, v množství 0,04 %; 0,06 %; 0,08 %; 0,1 %; 0,5 %; 1,5 %; 2,5 %; 3,5 %; 5,0 %; 8,0 %. Nutno je zde podotknout, že se konkrétních druhů a množství ztekucujících přísad, v keramickém průmyslu, při výrobě tzv. licích břeců, používají pro již upravenou surovinovou směs na bázi kaolinitu. Používaná ztekucovadla totiž běžně fungují právě na ztekucení kaolinitu. Vědeckým přínosem a unikátností této práce tedy bylo objasnění vlivu synergického působení ztekucujících či plastifikačních přísad s minerály obsaženými v různých typech neupravených zemin.

U samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl a písčité zeminy fgrCSa, které se díky vyššímu obsahu křemičitých složek (až nad 50 %) více podobají svým složení betonu, se očekávalo, že budou více reagovat s vybranými plastifikačními přísadami než se ztekucujícími přísadami, u kterých se očekávala větší synergie se samozhutnitelnými zálivkami na bázi jílu Cl. U plastifikačních přísad se zároveň očekávalo, že budou ochotněji reagovat s cementem, a proto jsou dále v textu uvedeny výsledky samozhutnitelných zálivek s rozdílným množstvím cementu (2 % – 8 %).

Účinek výše uvedených plastifikačních přísad byl ověřován se všemi třemi typy zemin (písčítým jílem saCl, písčitou zeminou „fgrCSa“ a jílem „Cl“). Zjištění účinku plastifikačních přísad bylo nejprve provedeno na samozhutnitelných zálivkách na bázi písčitého jílu saCl s 3,0 % vápna a 2 %, 4 % (6 %, 8 %) cementu. Poté bylo zjištění účinku plastifikačních přísad ověřováno na zálivkách na bázi písčitého jílu fgrCSa s 1,5 % vápna a 4 % (2 %, 6 % a 8 %) cementu. Na závěr byl ověřován účinek plastifikačních přísad u samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna a 2 %, 4 % (6 %, 8 %) cementu. Vzhledem k nutnosti přítomnosti pojiv (především cementu) v samozhutnitelných zálivkách, bylo ověření plastifikačních přísad předmětem následujících podetap řešení, zaměřených na synergický účinek pojiv s přísadami.

Předmětem této kapitoly bylo především ověření optimálního množství a druhu ztekucující přísady k danému typu zeminy. Vzhledem k povaze zemin bylo testování zaměřeno na písčitý jíl „saCl“. U této zeminy se, na rozdíl od mírně jílovitého jemnozrnného šterkovitého hrubozrnného písku „fgrCSa“, předpokládal větší účinek ztekucující přísady, která by ochotně reagovala spolu s jílovitými minerály (jemnozrnnými částicemi f), jež jsou v zemině obsaženy ve více jak 69 %. Zároveň písčitý jíl saCl, ve srovnání s jílem Cl, reprezentuje zeminu, která se svými vlastnostmi nejvíce podobá těm druhům zemin, jež jsou v ČR zastoupeny v největší míře. V běžné praxi se jedná o tzv. „spraše“. Tento typ zeminy obsahuje poměrně zastoupení jak jemnozrnných jílovitých částic

($f = 69,53 \%$), tak písčitéch ($s = 26,41 \%$), proto tedy byla vybrána jako reprezentativní pro uvěření účinku ztekucujících přísad. Pro konkrétní typ zeminy (písčitého jílu saCl) byly pro ověření zvoleny následující ztekucující přísady: hexametafosfát sodný, tripolyfosfát sodný a uhličitan sodný. Tyto ztekucující přísady byly ověřovány v množství 0,04 %; 0,06 %; 0,08 %; 0,1 %; 0,5 %; 1,5 %; 2,5 %; 3,5 %; 5,0 %; 8,0 % z hmotnosti zeminy. Zde si lze povšimnout, že na rozdíl od předchozích plastifikačních přísad se ztekucující přísady dávkovaly na hmotnost zeminy a ne cementu. Proto se mohl jejich účinek projevit i v menším množství. Na Obr. 84 jsou uvedeny výsledky testování jednotlivých ztekucujících přísad.



Obr. 84. Ověření účinku dispergačních činidel s jílovitou zeminou saCl

Při porovnání účinku plastifikačních přísad na ztekucení zeminy můžeme na Obr. 84 vidět, že největší vliv na ztekucení (hodnotu rozlití) měl uhličitan sodný. Tento účinek se projevil již při přidavku malého množství (0,04 % z hmot. zeminy) této přísady. Požadovaného rozlití (200 – 300 mm, podle zkoušky ASTM D 6103-96) bylo dosaženo při obsahu vody v množství 48,5 %. Použitím této přísady se podařilo snížit množství vody pro dosažení optimálního rozlití o 5 %.

Experimentálně bylo stanoveno, že uhličitán sodný (anorganický elektrolyt) reagoval především s jemnozrnnými jílovitými částicemi obsaženými v písčitém jílu saCl. Touto reakcí docházelo ke zvýšení elektrokinetického potenciálu, díky čemuž se snižovala viskozita. Chemicky se tato reakce projevila vázáním vícemocných kationtů na povrchu micely jílovitých minerálů. Sloučenina uhličitá sodného Na_2CO_3 při této reakci byla schopna vázat kationty Ca^{2+} a nahradit je za kationty 2Na^+ , což se projevilo ztekucením samozhutnitelné zálivky. Obecně jsou jílovité minerály složeny z určitých stavebních jednotek/vrstev (např. tetraedrů SiO_2 , oktaedrů $\text{Al}(\text{OH})_6$), které jsou vzájemně spojeny kovalentními vazbami. Ve většině případu jsou tyto vrstvy na sobě pravidelně uspořádány, ovšem někdy mohou vykazovat nepravidelnost. Kromě této nepravidelnosti se v mřížkách minerálů mohou vyskytovat poruchy vznikající izomorfní substitucí křemíku za železo nebo hliník. V důsledku tohoto nahrazení pak není kationtová částice navenek elektronukleární. Nicméně v místech, kde dochází k substituci, stejně jako tomu bylo i u jílovitých částic písčitého jílu saCl, se vytvářel nasycený záporný náboj, který měl rozhodující vliv na chování samozhutnitelných záливоk. Náboj jílovitých částic byl následně příčinou adsorpce vodních molekul, jež vytvářely kolem jílovitých částic vodní film. Voda adsorbovaná na jílovitých částicích s dostatečným lyofilním povrchem vytvořila pevnou vrstvičku, tzv. lyosféru, kde ztrácela své viskózní vlastnosti a mechanickým působením (mícháním samozhutnitelné zálivky) tak docházelo ke ztekucení. Tento jev souvisel i s hodnotou pH. Při použití uhličitá sodného došlo u samozhutnitelných záливоk ke zvýšení hodnoty pH a současně k vysrážení vápenatých iontů přítomných v systému jako uhličitán. Náboj povrchu byl tedy kompenzován za Na^+ ionty, které nedovolily přiblížení jílovitých částic do dosahu přitažlivých sil, čímž došlo ke ztekucení.

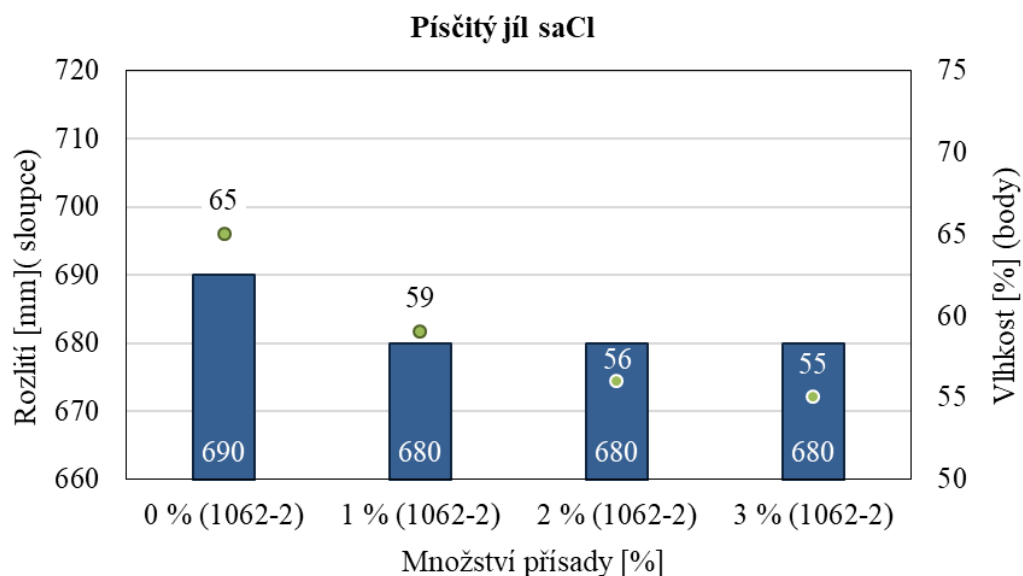
Při hodnocení účinku fosfátů (hexametafosfát sodný, tripolyfosfát sodný) na písčité jíl saCl (Obr. 84) lze konstatovat, že neměly významný vliv na ztekucení směsi a dosahovaly téměř totožných hodnot rozlití. Pro další experimentální činnost ověření přísad ve směsi zeminy s pojivy byl proto testován kromě výše zmíněných plastifikačních přísad (Sika ViscoCrete 21, Sika ViscoCrete 4088 a Sika ViscoCrete 1062) také uhličitán sodný v množství 0,08 %.

Kromě výše uvedených ztekucujících přísad byl, v rámci výzkumných prací disertace, na navržených samozhutnitelných zálivkách na bázi písčitého jílu saCl, ověřován rovněž účinek vodního skla od společnosti Vodní sklo a. s. Tato ztekucující přísada byla na základě doporučení od výrobce testována v množství 0,8 % z hmotnosti zeminy. První problémy při ověřování účinku vodního skla nastaly již při stanovování reologických vlastností záливоk.

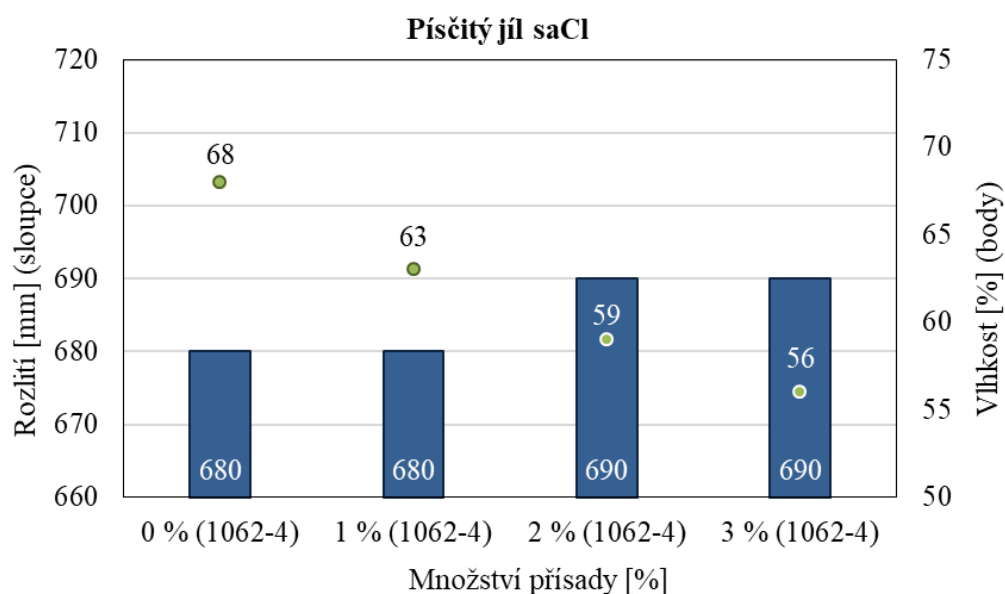
V případě samozhutnitelné zálivky na bázi písčitého jílu saCl bez přídavku pojiv se přídavek vodního skla výrazně neprojevoval. Ovšem při použití pojiv (1,5 % vápna a 2 % - 4 % cementu) k zemině saCl docházelo k nutnosti přidávání nadměrného, mnohdy až neúčelného, množství vody pro získání hodnoty optimálního rozlití. Tento jev byl způsoben okamžitou reakcí vodního skla s pojivy a vodou, jež znesnadňovaly zpracovatelnost směsi. Obecně se účinek vodního skla s danou zeminou neprojevil jako vhodný pro další použití. Z těchto důvodů bylo sklo z výzkumných prací vyřazeno a dále jsou uvedeny pouze výsledky účinku vybraného druhu ztekucující přísady (uhličitanu sodného) s vytipovanými zeminami.

4.3.2 Sledování vlivu plastifikačních a ztekucujících přísad na zeminu saCl

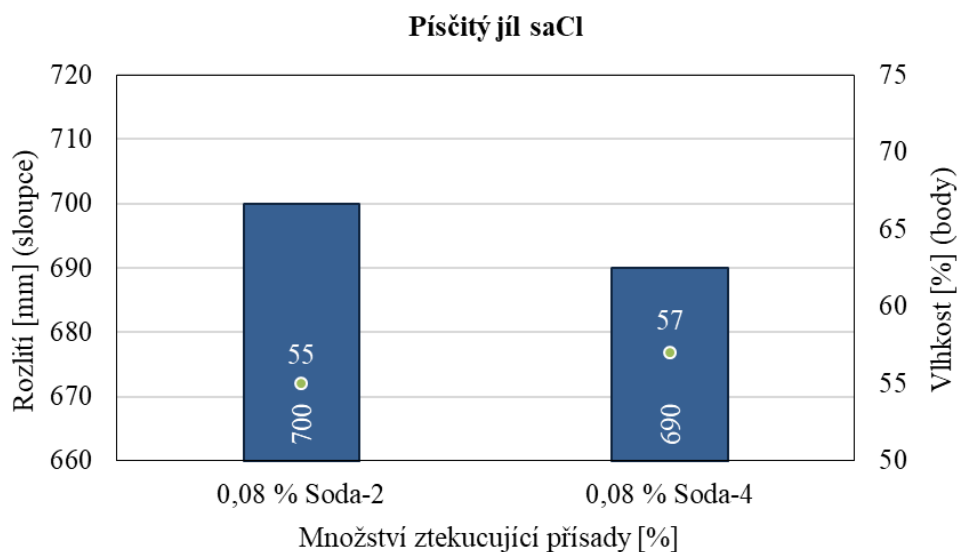
Pro dosažení lepších vlastností samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl jak v čerstvém, tak v zatvrdlém stavu, byly v rámci dalších výzkumných prací navrženy zálivky s přídavkem plastifikačních a ztekucujících přísad. Zjištění účinku plastifikačních a ztekucujících přísad bylo provedeno na vybraných samozhutnitelných zálivkách na bázi písčitého jílu saCl s 3,0 % vápna a 2 %, 4 % (6 %, 8 %) cementu. Použitými plastifikačními přísadami byly: Sika ViscoCrete 21, Sika ViscoCrete 4088 a Sika ViscoCrete 1062. Plastifikační přísady byly k vybraným samozhutnitelným zálivkám přidány v množství 1 %, 2 % a 3 % z hmotnosti cementu. Použitou ztekucující přísadou byl uhličitan sodný (dále také „soda“) v množství 0,08 % z hmotnosti zeminy. Nutno je zde poznamenat, že pro ověření účinku plastifikačních přísad byla navržena řada receptur, na základě kterých byly samozhutnitelné zálivky optimalizovány. V následujících grafech Obr. 85 až Obr. 96 jsou proto uvedeny výsledky již vybraných optimalizovaných samozhutnitelných zálivek. Ostatní výsledky experimentální činnosti jsou uvedeny v rámci příloh (Příloha 26 a) až p)).

4.3.2.1. Stanovení sednutí-rozlítím

Obr. 85. Závislost rozliti na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 % cementu a 0-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



Obr. 86. Závislost rozliti na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 4 % cementu a 0-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



Obr. 87. Závislost rozliti na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 a 4 % cementu a 0,08 % uhličitanu sodného (sody)

Na Obr. 85 je uvedena závislost rozliti na vlhkosti samozhutnitelné zálivky na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 % cementu a 0 – 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete 1062. Kromě plastifikační přísady Sika ViscoCrete 1062 byl s touto zálivkou ověřován i účinek plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 21 (Příloha č. 26 a)) a plastifikační přísada Sika ViscoCrete – 4088 (Příloha č. 26 b)). Obr. 86 znázorňuje závislost rozliti na samozhutnitelné zálivce na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 4 % cementu a 0 – 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062. Na Obr. 87 můžeme vidět vliv ztekucující přísady (0,08 % uhličitanu sodného) na samozhutnitelnou zálivku na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna a 2 % a 4 % cementu.

Na základě zjištěných hodnot parametru rozliti (Obr. 85 až Obr. 87, Příloha č. 26 a), b)) lze konstatovat, že největší účinek pro snížení množství vody potřebné pro získání optimální konzistence samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl měla plastifikační přísada Sika ViscoCrete 1062 a to v množství 3,0 % a uhličitan sodný v množství 0,08 %. Při použití plastifikační přísady Sika ViscoCrete 1062 v hodnotě 3,0 % bylo dosaženo snížení množství vody až na hodnotu 55 %, při zachování hodnoty rozliti 680 mm (Obr. 85). Ostatní ověřované druhy plastifikačních přísad (Sika ViscoCrete – 21 a Sika ViscoCrete – 4088) množství vody, potřebné pro získání hodnoty optimálního rozliti, mírně snižovaly, ovšem ne tak významně, jako tomu bylo u plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062 (viz Příloha č. 26 a), b)). Experimentálně bylo tedy stanoveno, že z hlediska dosažení optimálního parametru rozliti a snížení množství vody,

se jako nejúčinnější projevilo použití plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062 v množství 3,0 % (z hmot. cementu).

Na základě výše dosažených výsledků byl dále v rámci výzkumných prací disertace ověřován synergický účinek plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062 (v množství 3,0 % z hmot. cementu) se zvýšenou dávkou cementu (6 % a 8 %). Dosažené výsledky samozhutnitelných zálivek jsou uvedeny v Přílohách č. 26 c) a d). Z Obr. 85, Obr. 86 a Příloh č. 26 c), d) lze vidět, že s přibývajícím množstvím cementu docházelo k mírnému zvyšování hodnot rozlití samozhutnitelných zálivek (až na 720 mm, při 8% dávce cementu a 61 % vlhkosti). Z grafů si lze povšimnout, že se zvyšující se dávkou cementu se zvyšovala i hodnota vlhkosti. Tento fakt byl způsoben okamžitou reakcí cementu s vodou za vzniku hydratačních produktů. Významně ovšem zvyšující se dávka cementu množství vody, potřebné pro získání optimálního rozlití, neovlivňovala. Z experimentálního stanovení vlivu plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062 (v množství 3,0 % z hmot. cementu) na zvyšující se dávku cementu byl jednoznačně prokázán synergický účinek, na základě kterého bylo možné dosáhnout zlepšení parametru rozlití a snížení vlhkosti. Na základě jednoznačného prokázání synergického účinku plastifikační přísady Sika ViscoCrete 1062 byla tato přísada vybrána pro návrh samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa a jílu Cl.

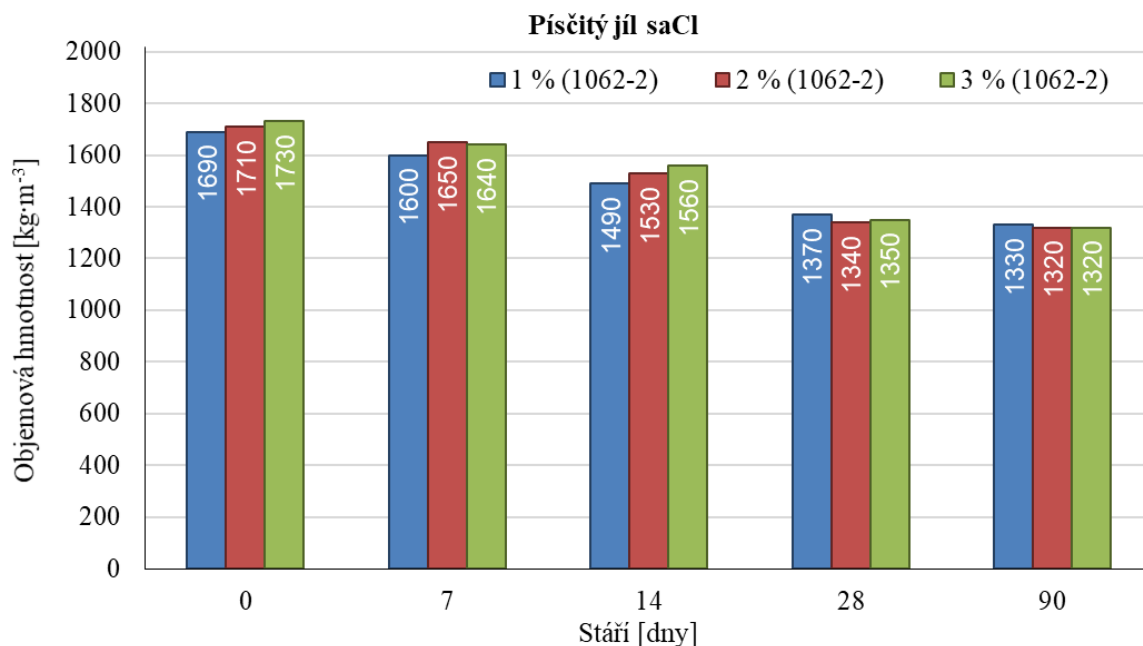
Z Obr. 87 si lze povšimnout, že ve srovnání s předchozími plastifikačními přísadami, především pak plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062 (v množství 3,0 % z hmot. cementu) bylo u samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna a 2 – 4 % cementu, dosaženo ještě většího snížení množství vlhkosti (na hodnotu 55 %) a zvýšení parametru rozlití (na hodnotu 700 mm) za pomoci ztekucující přísady uhličitanu sodného v množství 0,08 % (z hmot. zeminy). Uhličitan sodný reagoval především s jemnozrnnými jílovitými částicemi obsaženými v písčitém jílu saCl.

Vzhledem k tomu, že byly jemnozrnné jílovité částice obsaženy v písčitém jílu ve větším množství ($f = 69,53 \%$) ukázal se vliv ztekucující přísady na rozlití a vlhkost, ve srovnání s plastifikační přísadou, jako účinnější. Výhodou použití ztekucující přísady je, ve srovnání s plastifikační přísadou také to, že se dávákuje na hmotnost zeminy, a proto lze při návrhu samozhutnitelných zálivek snížit množství cementu, což nám snižuje i cenu.

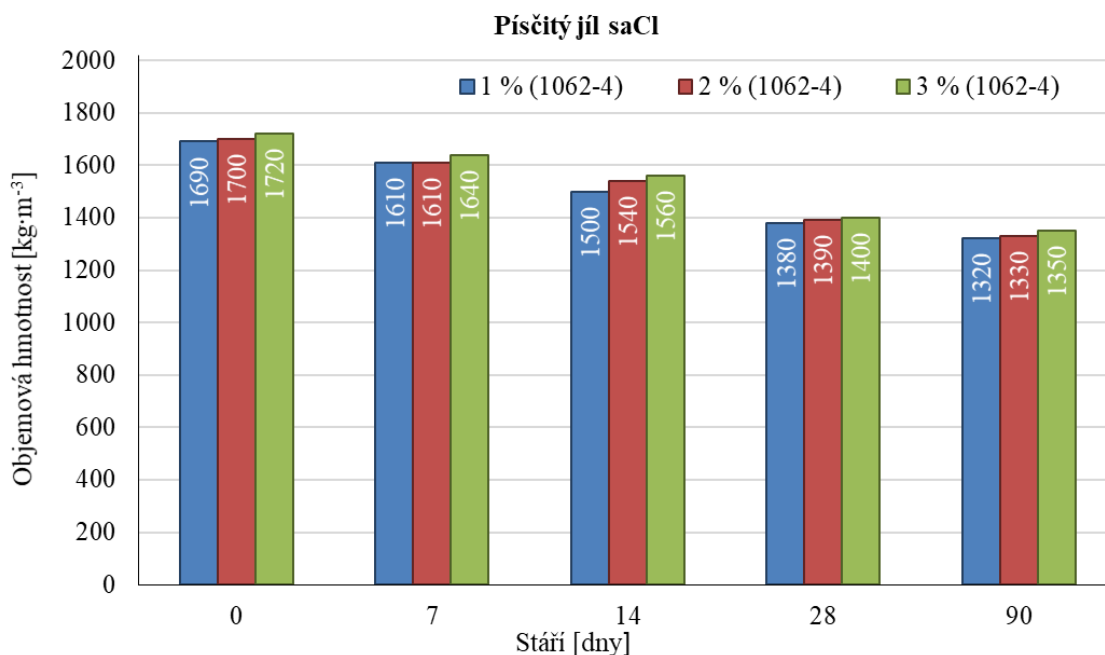
V souvislosti s výsledky hodnot rozlití a vlhkosti samozhutnitelných zálivek, které byly ověřovány v rámci II Etapy, lze obecně konstatovat, že použitím plastifikačních

a ztekucujících přísad bylo dosaženo snížení hodnot vlhkosti pro dosažení optimální hodnoty rozlití. Jak je uvedeno dále plastifikační a ztekucující přísady měly vliv na úpravu i dalších parametrů samozhutnitelných zálivek, především na zvýšení pevnosti v tlaku a snížení hodnoty smrštění.

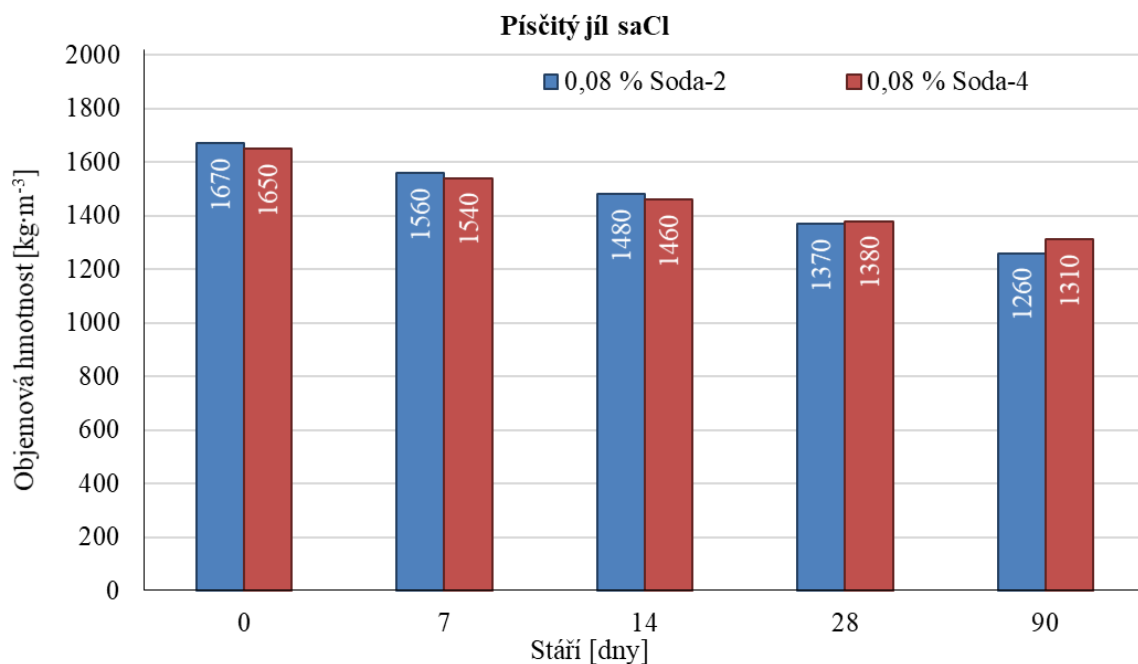
4.3.2.2. Stanovení objemové hmotnosti



Obr. 88. Objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



Obr. 89. Objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 4 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



Obr. 90. Objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 a 4 % cementu a 0,08 % uhličitanu sodného (sody)

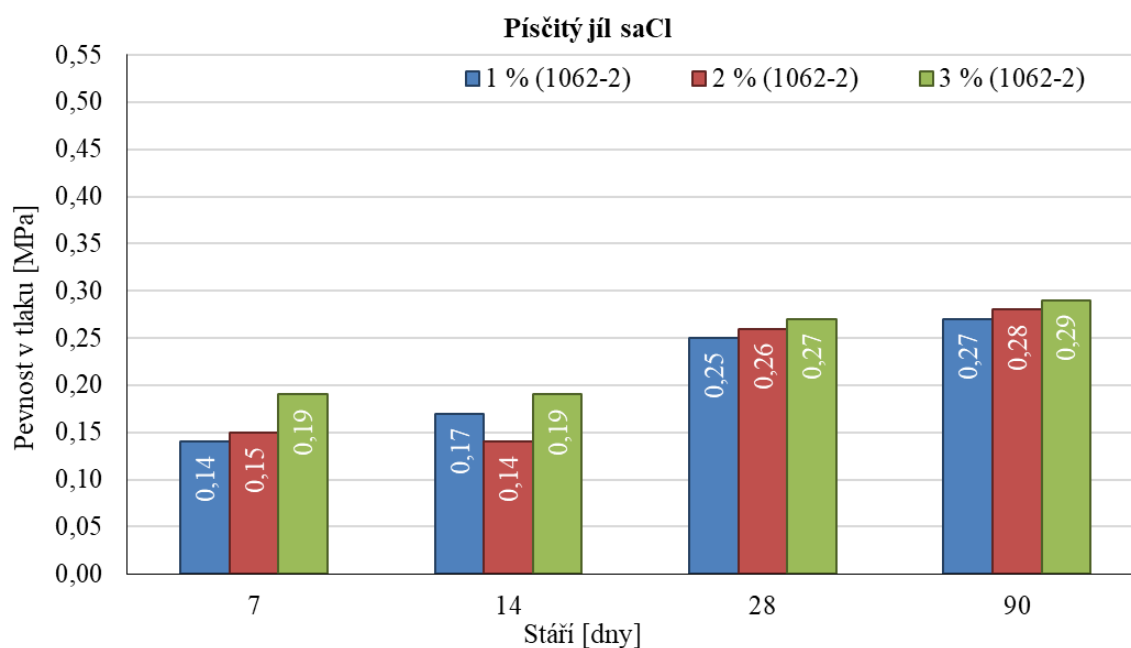
Na Obr. 88 až Obr. 90 a v Příloze č. 26 e) až h) jsou uvedeny výsledné hodnoty objemových zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 – 4 % (6 % a 8 %) cementu, 1 – 3 % plastifikačních přísad (Sika ViscoCrete – 1062, Sika ViscoCrete – 21 a Sika ViscoCrete – 4088) a 0,08 % uhličitanu sodného.

Při porovnání vlivu plastifikačních přísad (Sika ViscoCrete – 1062, Sika ViscoCrete – 21 a Sika ViscoCrete – 4088), v množství 1 – 3 %, na objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl a 2 % (až 8 %) cementu lze konstatovat, že nejnižších hodnot objemových hmotností (až $1640 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ v čerstvém stavu a $1320 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ po 28 dnech zrání) bylo dosaženo u zálivky obsahující 2 % cementu a 1 % plastifikační přísady SikaViscoCrete – 21 (viz Příloha č. 26 e)). Ve srovnání s ostatními plastifikačními přísadami byl zaznamenán mírný nárůst objemových hmotností u samozhutnitelných zálivek obsahujících plastifikační přísadu Sika ViscoCrete – 1062 a se zvyšující se dávkou cementu (viz. Obr. 88, Obr. 89 a Příloha č. 26 e) až h). Změna objemových hmotností byla u samozhutnitelných zálivek způsobena snižujícím se množstvím vody, v důsledku působení plastifikačních přísad, a to nejen v čerstvém, ale i v zatvrdlém stavu.

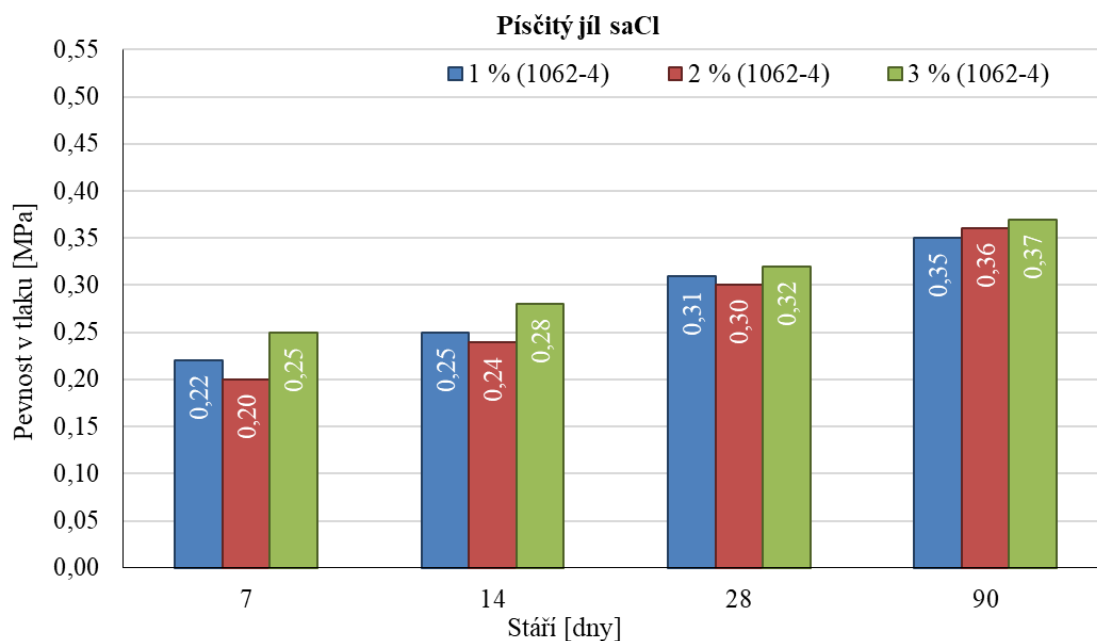
Z výsledků hodnocení objemových hmotností samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, ve kterých byl použit uhličitan sodný (Obr. 90) lze konstatovat, že s přibývajícím množstvím cementu a tedy i mírným zvyšováním vody docházelo ke snižování

objemových hmotností směsí. Tento jev byl způsoben nahrazením primární suroviny, kterou je zemina cementem a vodou. Zároveň docházelo ke snižování objemových hmotností po určité době zrání (7, 14, 28 a 90 dnech), což bylo způsobeno odpařováním vody ze vzorků. Ve srovnání působení uhličitánu sodného a plastifikačních přísad na objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek lze vidět, že objemové hmotnosti zálivek obsahujících uhličitánu sodný byly mírně nižší. Tento fakt byl způsoben, jak již bylo zmíněno výše množstvím vody, které bylo do zálivek přidáno již v čerstvém stavu.

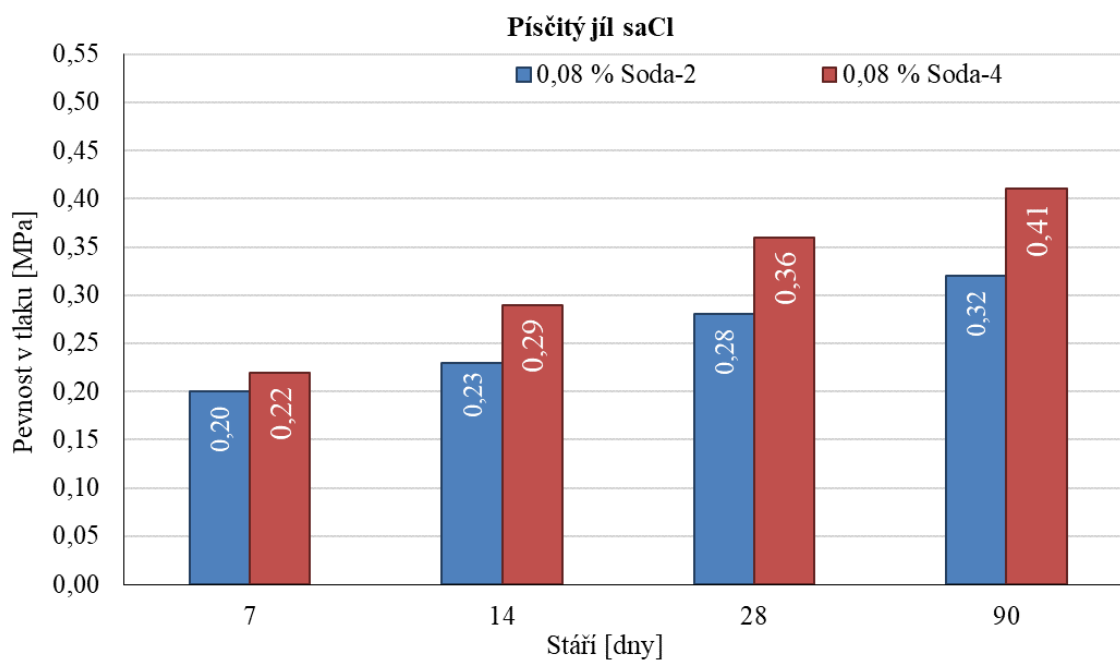
4.3.2.3. Stanovení pevnosti v tlaku



Obr. 91. Pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



Obr. 92. Pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 4 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



Obr. 93. Pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 a 4 % cementu a 0,08 % uhličitanu sodného (sody)

Na Obr. 91 až Obr. 93 a v Přílohách 26 i) až l) jsou uvedeny výsledné hodnoty samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 %, 4 % (6 % a 8 %) cementu, plastifikačních přísad (1 – 3 % Sika ViscoCrete – 21,

Sika ViscoCrete – 4088 a Sika ViscoCrete – 1062) a ztekucujících přísad (0,08 % uhličitanu sodného). Na prvních dvou grafech (Obr. 91 a Obr. 92) jsou uvedeny samozhutnitelné zálivky na bázi písčitého jílu saCl s 3,0 % vápna, zvyšující se dávky cementu (2 % a 4 %) a s použitím 1 – 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062. Sledování vlivu zvyšující se dávky cementu (6 % a 8 %) s použitím plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062 (v množství 1 – 3 %) na výsledné hodnoty pevností v tlaku je uvedeno v Přílohách č. 26 k), l). Výsledky hodnot pevností v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 – 4 % cementu a 0,08 % uhličitanu sodného jsou uvedeny na Obr. 93.

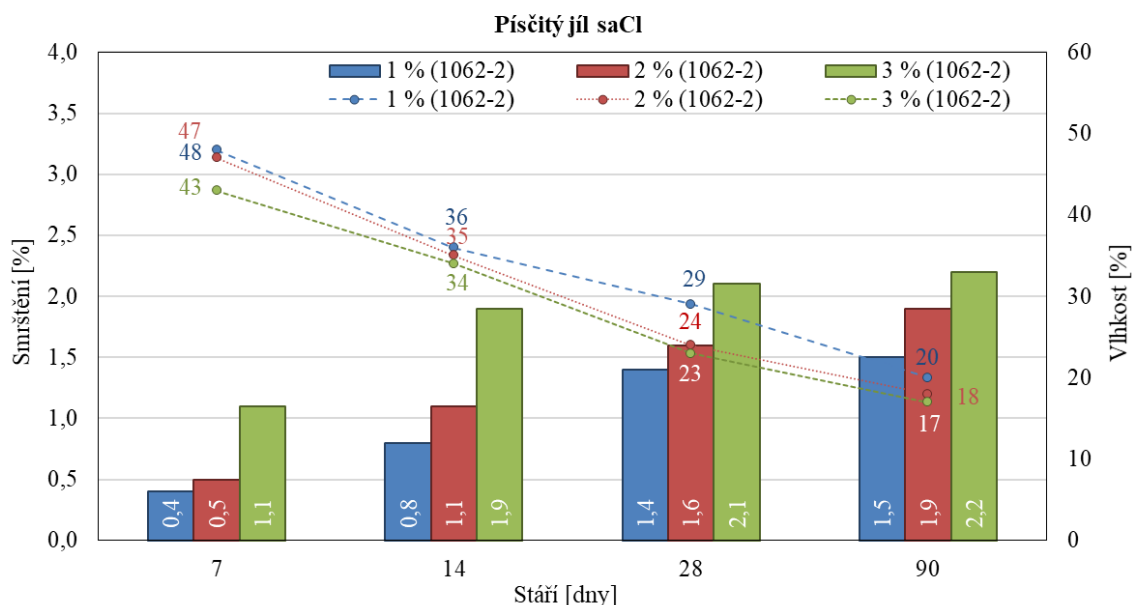
Jak můžeme vidět z grafů Obr. 91, Obr. 92 a z Příloh č. 26 i) až l) nejvyšších hodnot pevností v tlaku (až 0,42 MPa po 28 dnech zrání) dosahovaly samozhutnitelné zálivky na bázi písčitého jílu saCl obsahující plastifikační přísadu Sika ViscoCrete – 21 a Sika ViscoCrete – 1062 v množství 3,0 %. Tento jev byl způsoben snížením množství vody potřebného pro získání optimální konzistence směsi již v čerstvém stavu. Zvyšování pevnosti v tlaku pak ještě narůstalo se zvyšující se dávkou cementu v průběhu zrání (po 7, 14, 28 a 90 dnech). Z hlediska výsledků pevností v tlaku lze tedy konstatovat, že se jako optimální jeví použití plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 21 v množství 3,0 %. Ovšem s ohledem i na parametry rozlití se jako optimální jeví spíše použití plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062 v množství 3,0 %.

U samozhutnitelné zálivky na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 % cementu a plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062 (v množství 3,0 % z hmot. cementu) bylo dosaženo pevnosti v tlaku 0,27 MPa po 28 dnech zrání (viz Obr. 91). U samozhutnitelné zálivky obsahující vyšší dávku cementu (4 %) bylo dosaženo pevnosti v tlaku 0,32 MPa po 28 dnech zrání (viz Obr. 92). Na základě výsledků pevností v tlaku lze z hlediska vývoje pevnosti v tlaku po určité době zrání zařadit do kategorie „vyhloubitelné“.

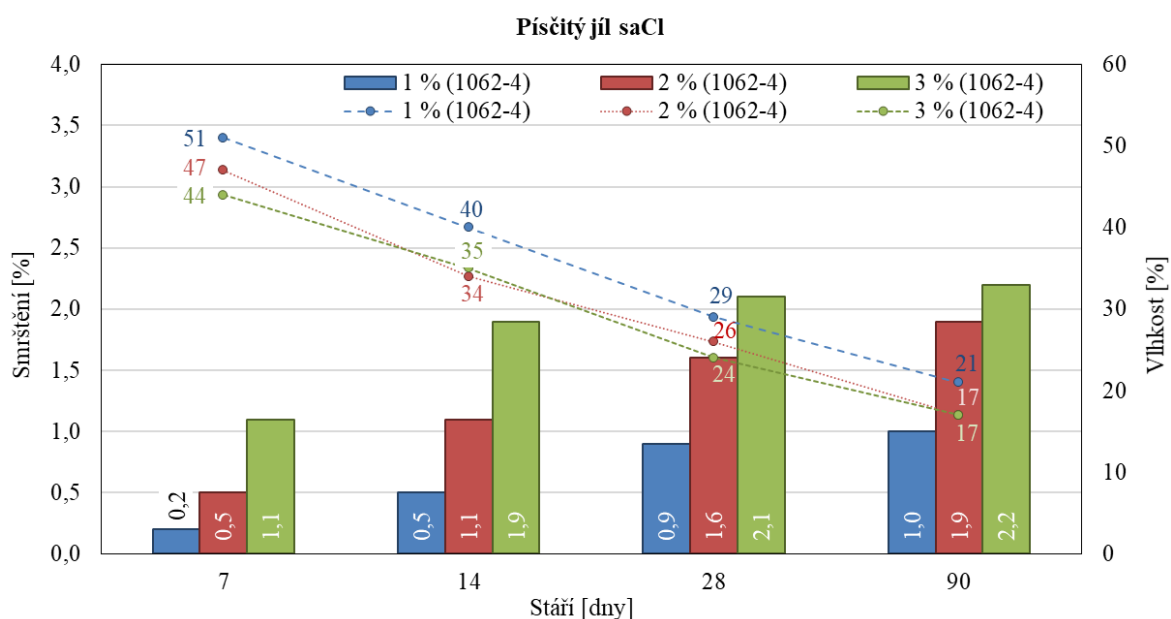
Při porovnání hodnot pevností v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 % a 4 % cementu, plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062 a ztekucující přísady uhličitanu sodného (viz Obr. 91 až Obr. 93) lze konstatovat, že vyšších pevností bylo dosaženo u zálivek obsahujících ztekucující přísadu, tedy uhličitan sodný. Nejvyšší pevnosti v tlaku 0,41 MPa, po 90 dnech zrání, bylo dosaženo u samozhutnitelné zálivky na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 4 % cementu a 0,08 % uhličitanu sodného.

Obecně lze konstatovat, že stejně jako tomu bylo u stanovení hodnoty rozlití, tak i při stanovení pevnosti vlaku bylo dosaženo pomocí plastifikačních a ztekucujících přísad zlepšení těchto hodnot.

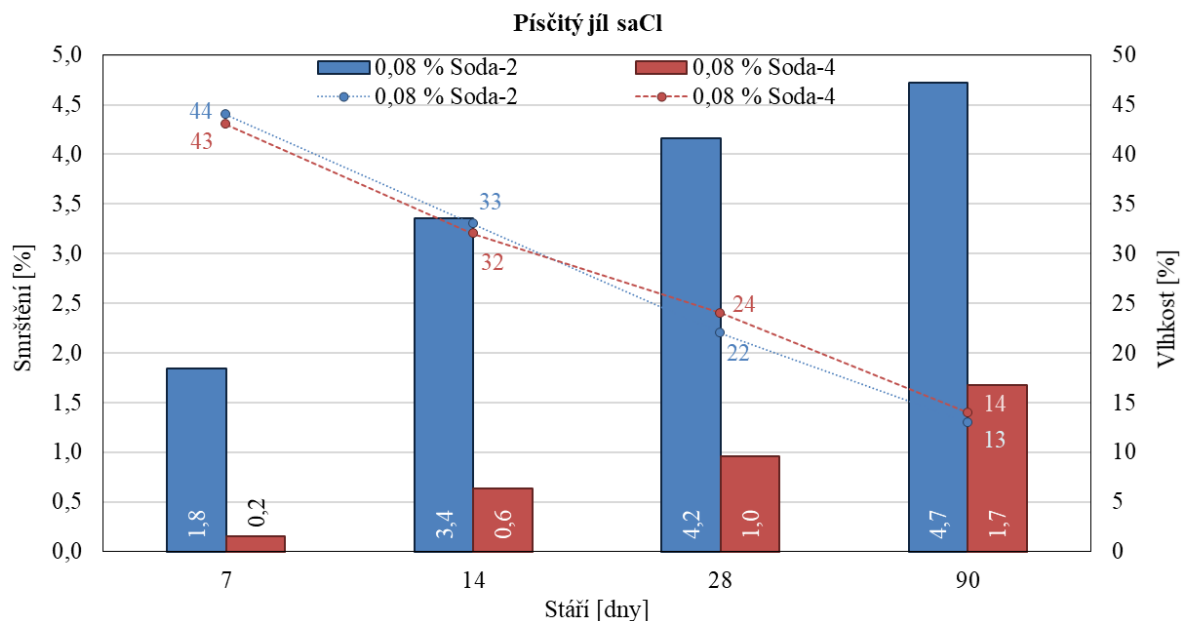
4.3.2.4. Stanovení smrštění a vlhkosti



Obr. 94. Závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písečitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



Obr. 95. Závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písečitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 4 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



Obr. 96. Závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 a 4 % cementu a 0,08 % uhličitanu sodného (sody)

Na Obr. 94 až Obr. 96 a v Přílohách č. 26 m) až p) jsou uvedeny výsledné hodnoty samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 %, 4 % (6 % a 8 %) cementu, 1 – 3 % plastifikačních přísad (Sika ViscoCrete – 21, Sika ViscoCrete – 4088 a Sika ViscoCrete – 1062) a 0,08 % uhličitanu sodného. První dva grafy (Obr. 94 a Obr. 95) znázorňují závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 % - 4 % cementu a 1 – 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062. Ověřování účinku dalších druhů přísad (Sika ViscoCrete – 21, Sika ViscoCrete – 4088) na smrštění a vlhkost je uvedeno v Přílohách č. 26 m), n). Sledování vlivu zvyšující se dávky cementu (6 % a 8 %) na hodnotu smrštění a vlhkosti u samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu Cl, 3,0 % vápna a 1 – 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062 je uvedeno v Přílohách č. 26 o), p). Na Obr. 96 je pak uvedena závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 a 4 % cementu a 0,08 % uhličitanu sodného.

Při porovnání hodnot smrštění samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl a plastifikačních přísad (Obr. 94, Obr. 95 a Přílohy č. 26 m) až p)) můžeme konstatovat, že nejmenšího smrštění (1,5 % po 28 dnech zrání) dosahovaly samozhutnitelné zálivky obsahující plastifikační přísadu Sika ViscoCrete 1062 v množství 3,0 % (z hmot. cementu)

a se zvyšující se dávkou cementu. Snížení smrštění samozhutnitelných zálivek obsahujících plastifikační přísadu Sika ViscoCrete – 1062 souviselo s množstvím vody, které se do zálivky přidávalo pro získání optimální konzistence. Cement se v zálivkách projevil zároveň jako účinný stabilizátor, který měl za následek snížení smrštění v průběhu zrání. Z obrázků Obr. 94, Obr. 95 a Příloh č. 26 m) až p) lze zároveň vidět, že smrštění se postupem času mírně zvyšovalo, což bylo způsobeno odpařováním vody v průběhu zrání.

Při sledování účinku plastifikační a ztekucující přísady na hodnotu smrštění samozhutnitelných zálivek lze konstatovat, že menšího smrštění (na hodnotu 1,0 % po 28 dnech zrání) bylo dosaženo u zálivek obsahujících ztekucující přísadu uhličitán sodný, a to především v tom případě, kdy zálivka obsahovala 4 % cementu (viz Obr. 96). Snížení hodnoty smrštění, stejně jako tomu bylo u předchozích zálivek, souviselo s nižší dávkou vody, která se k zálivkám přidávala již v čerstvém stavu. Na základě zjištěných hodnot lze konstatovat, že se uhličitán sodný v množství 0,08 % projevil účinně nejen u zlepšení parametru rozlití, pevnosti v tlaku, ale i u smrštění.

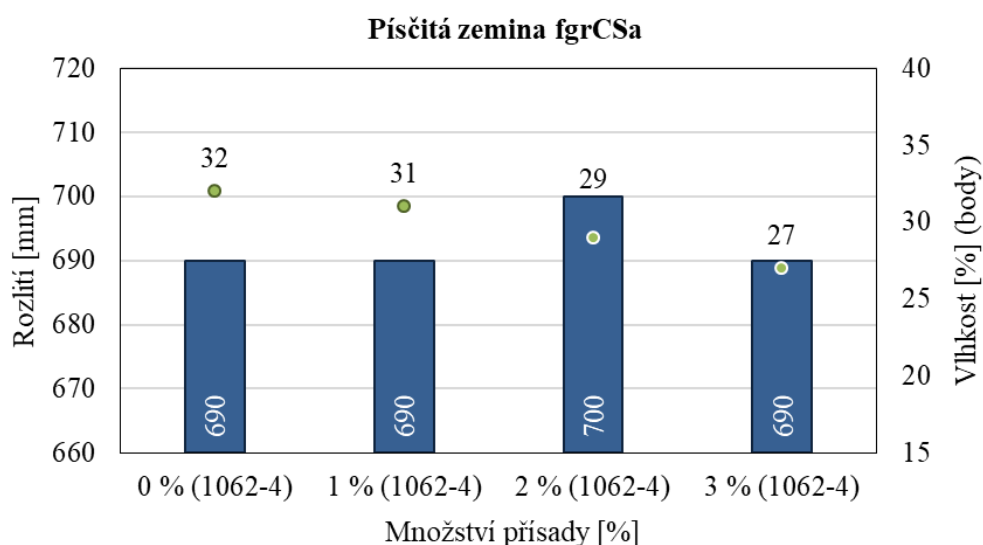
Obecně lze konstatovat, že u samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl bez použití plastifikačních a ztekucujících přísad (viz Etapa II), bylo dosaženo horších parametrů rozlití, pevnosti v tlaku a smrštění, než u zálivek, u kterých byly použity plastifikační a ztekucující přísady. Velmi účinně se pro zlepšení výše uvedených parametrů jevílo u samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 – 4 % cementu použití plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062 (v množství 3,0 % z hmot. cementu) a ztekucující přísady uhličitanu sodného (v množství 0,08 % z hmot. zeminy). Na základě zjištěných poznatků o účinku plastifikačních a ztekucujících přísad, byly pro návrh následujících druhů samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa a jílu Cl, zvoleno použití již ověřených druhů plastifikačních přísad, tedy plastifikační přísady SikaViscoCrete – 1062 (v množství 1 – 3 %) a ztekucující přísady uhličitanu sodného (v množství 0,08 %).

4.3.3 Sledování vlivu plastifikační přísad na zeminu fgrCSa

V rámci předchozích výzkumných prací bylo zjištěno, že největší vliv na úpravu vlastností samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, jak v čerstvém, tak v zatvrdlém stavu měla plastifikační přísada Sika ViscoCrete 1062 v množství 3 % (z hmot. cementu) a uhličitán sodný v množství 0,08 % (z hmot. zeminy). Při návrhu samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa se proto vycházelo jak z výsledků zkoušek, které byly získány u předchozí zeminy, tak z jejího mineralogického složení a zároveň z doporučení od výrobce.

Vzhledem k mineralogickému složení písčité zeminy fgrCSa, která, ve srovnání s předchozím písčitým jílem saCl, obsahovala menší množství jemnozrnných jílovitých částic ($f = 9,55 \%$) na úkor písčitých ($s = 58,70 \%$, $g = 31,74 \%$), byly pro návrh samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa zvoleny pro ověření plastifikační přísady: Sika ViscoCrete – 21, Sika ViscoCrete – 4088 a Sika ViscoCrete – 1062 v množství 0 % - 3 % (z hmot. cementu). U těchto plastifikačních přísad, se očekávalo, že budou lépe reagovat spolu s křemičitými složkami obsaženými v písčité zemině fgrCSa a především pak s vyšším obsahem cementu (4 % - 8 %). Na základě zjištěných poznatků o účinku ztekucující přísady uhličitanu sodného na písčité jíl saCl a na základě mineralogického složení písčité zeminy fgrCSa nebyl proveden návrh na ověřování účinku této přísady. Dosažené výsledky sledování vlivu plastifikačních přísad na samozhutnitelné zálivky na bázi fgrCSa 1,5 % vápna, 4 % (až 8 %) cementu a 1 – 3 % plastifikačních přísad (Sika ViscoCrete – 21, Sika ViscoCrete – 4088 a Sika ViscoCrete – 1062) jsou uvedeny v následujících grafech Obr. 97 až Obr. 100 a v Přílohách č. 27 a) až p).

4.3.3.1. Stanovení sednutí-rozlítím



Obr. 97. Závislost rozliti na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % cementu a 0-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062

Na Obr. 97 a v Přílohách č. 27 a) až d) můžeme vidět závislost rozliti na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zemin fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % (až 8 %) cementu a 0 – 3 % plastifikačních přísad (Sika ViscoCrete – 21, Sika ViscoCrete – 4088 a Sika ViscoCrete – 1062). Obr. 97 zobrazuje závislost rozliti na vlhkosti samozhutnitelných

zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % cementu a 0-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062. V Přílohách č. 27 a), b) jsou pro srovnání předchozí plastifikační přísady (Sika ViscoCrete – 1062) uvedeny výsledné hodnoty závislosti rozlití na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa obsahující plastifikační přísadu Sika ViscoCrete – 21 a Sika ViscoCrete – 4088 v množství 0 – 3 % (z hmot. cementu). Příloha č. 27 c) a d) pak uvádí závislost rozlití na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa obsahující 1,5 % vápna, zvýšenou dávku cementu (6 % a 8 %) a 0 – 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062.

Z výsledků sledování závislosti rozlití na vlhkosti směsí na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % (až 8 %) cementu a 0 – 3 % rozdílných druhů plastifikačních přísad (Obr. 97 a Přílohy č. 27 a), b)) lze vidět, že největší vliv na rozlití (a snížení vlhkosti) měla plastifikační přísada Sika ViscoCrete – 1062 v množství 3,0 % (z hmot. cementu). Při použití této přísady v množství 3,0 % bylo dosaženo hodnoty rozlití 690 mm a vlhkosti 27 %. Stejně jako tomu bylo u předchozí zeminy (písčitého jílu saCl) i u písčité zeminy fgrCSa se účinněji projevilo pro zlepšení parametru rozlití a snížení vlhkosti použití plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062. Ostatní druhy přísad (Sika ViscoCrete – 21 a Sika ViscoCrete – 4088, v množství 1 – 3 % z hmot. cementu) hodnoty rozlití a vlhkosti snižovaly, ovšem rozdíly těchto hodnot nebyly příliš významné.

Z grafu Obr. 97 a Příloh č. 27 c), d) si lze povšimnout, že se hodnoty vlhkosti samozhutnitelných zálivek mírně zvyšovaly se zvyšující se dávkou cementu. Ovšem hodnoty rozlití byly více méně zachovány. Zvyšování vlhkosti bylo způsobeno tím, že cement ze směsi odebíral vodu nutnou pro jeho hydrataci. Proto bylo nutné, pro dosažení optimálních hodnot rozlití dávku vody zvyšovat. Zároveň lze ale konstatovat, že se přítomnost plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062, především v množství 3,0 % (z hmot. cementu) naopak potřebné množství vody mírně redukovala. A díky tomu mohlo být dosaženo snížení potřebného množství vody pro získání optimálního rozlití.

Na základě zjištěných parametrů lze konstatovat, že pro získání optimální hodnoty rozlití samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % cementu je vhodné použití plastifikační přísady Sika ViscoCrete 1062 v množství 3,0 % (z hmot. cementu).

Při provádění zkoušek rozlití bylo u samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa zaznamenáno mírné odlučování vody (tzv. bleedingu), které po cca 12 hodinách odeznělo. Tento fakt byl způsoben tím, že měla písčitá zemina fgrCSa nepravidelnou křivku

zrnitosti. U této zeminy chyběla jemná frakce, která by vyplnila prostor mezi hrubozrnnějšími částicemi, jež by bleeding snížili či mu zcela zamezily. Pro snížení bleedingu by bylo vhodné k zemině přimíchat určité množství jiného druhu zeminy (jemnozrnnější) či použití vedlejších energetických produktů.

4.3.3.2. Stanovení objemové hmotnosti

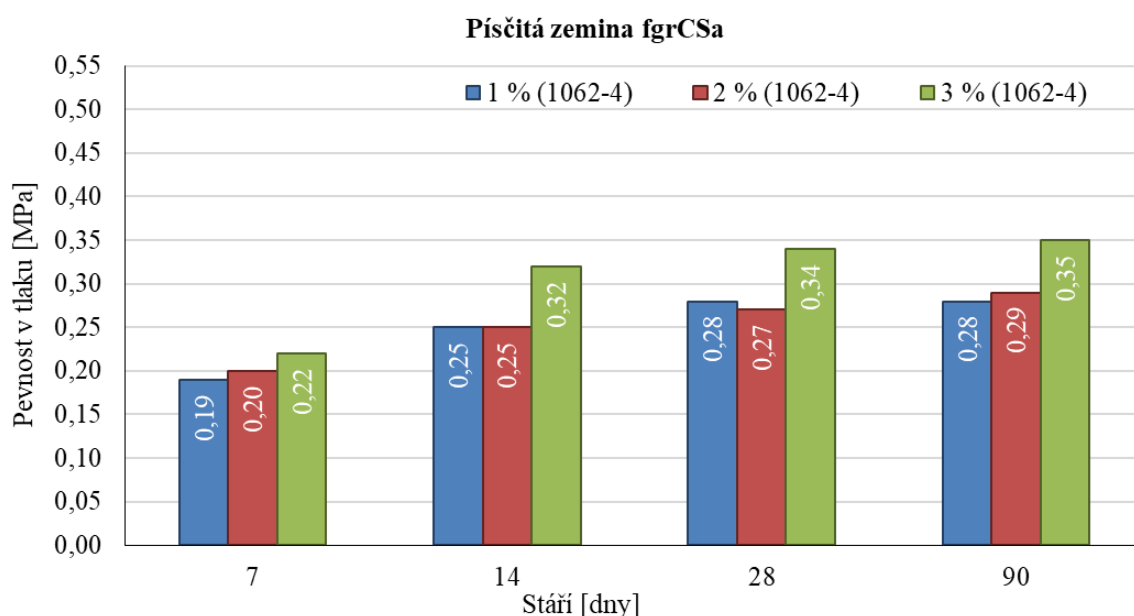


Obr. 98. Objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062

Na Obr. 98 a v Přílohách č. 27 e) až h) jsou uvedeny výsledné hodnoty objemových hmotností samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % (až 8 %) cementu a 1-3 % plastifikačních přísad (Sika ViscoCrete – 21, Sika ViscoCrete – 4088 a Sika ViscoCrete – 1062). Obr. 98 zobrazuje výsledné hodnoty objemových hmotností samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062. V Přílohách č. 27 e) a f) jsou pak uvedeny výsledné hodnoty objemových hmotností samozhutnitelných zálivek z hlediska působení plastifikačních přísad Sika ViscoCrete – 21, Sika ViscoCrete – 4088 v množství 1 – 3 % z hmot. cementu. Příloha č. 27 g) a h) zobrazuje výsledné vlastnosti objemových hmotností samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa z hlediska působení vyšší dávky cementu v kombinaci s plastifikační přísadou Sika ViscoCrete – 1062.

Při sledování parametru objemových hmotností samozhutnitelných na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % (až 8 %) cementu a 1 - 3 % plastifikačních přísad (Sika ViscoCrete – 21, Sika ViscoCrete – 4088 Sika ViscoCrete 1062), jak je uvedeno na Obr. 98 a v Přílohách č. 27 e) až h), můžeme vidět, že se výsledné hodnoty od sebe výrazně nelišily. Mírně se snižovaly hodnoty objemových hmotností samozhutnitelných zálivek se zvyšující se dávkou cementu a v průběhu času (po 7, 14, 28 a 90 dnech zrání). Zvyšující se objemové hmotnosti byly zaznamenány se zvyšující se dávkou plastifikačních přísad, ovšem po 28 dnech zrání se tyto hodnoty snižovaly. Tento fakt byl ovlivněn především množstvím vlhkosti, která postupem času ze vzorků odcházela.

4.3.3.3. Stanovení pevnosti v tlaku



Obr. 99. Pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % cementu a 1 - 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062

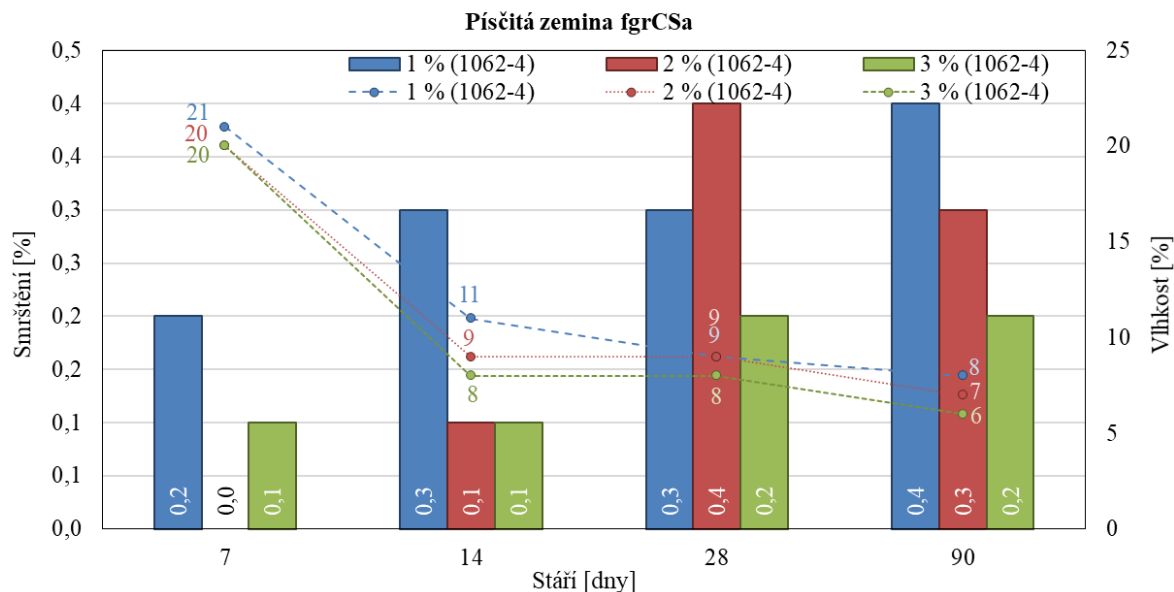
Na Obr. 99 a v Přílohách č. 27 i) až l) jsou uvedeny výsledné hodnoty pevností v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % (až 8 %) cementu a 1-3 % plastifikačních přísad (Sika ViscoCrete – 21, Sika ViscoCrete – 4088 a Sika ViscoCrete – 1062). Obr. 99 uvádí výsledné hodnoty pevností v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062. V prvních dvou Přílohách č. 27 i) a j) jsou uvedeny dosažené výsledky pevností v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, u které byla použita plastifikační přísada Sika ViscoCrete – 21, Sika ViscoCrete – 4088. Sledování účinku vyšší

dávky cementu (6 % a 8 %) spolu v kombinaci s 1 – 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062 na pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa jsou uvedeny v Přílohách č. 27 k) a l).

Z Obr. 99 a Příloh č. 15 i) a j) můžeme vidět, že na pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa měla největší vliv plastifikační přísada Sika ViscoCrete – 1062 v množství 3,0 % (z hmot. cementu). U samozhutnitelné zálivky na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % cementu a 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062 bylo dosaženo po 28 dnech zrání pevnosti v tlaku 0,34 MPa. Pevnost v tlaku se ještě mírně zvyšovala s dobou zrání. U ostatních druhů plastifikačních přísad (Sika ViscoCrete – 21, Sika ViscoCrete – 4088) bylo dosaženo nižších hodnot pevnosti v tlaku. Ovšem nutné je zde konstatovat, že i přes to, že byly tyto hodnoty nižší, tak splňovaly požadavky normy, kdy má mít samozhutnitelná zálivka po 28 dnech zrání pevnost v tlaku 0,2 MPa. Z dosažených výsledků pevností v tlaku lze také konstatovat, že nárůst těchto hodnot bylo ovlivněno zvyšující se dávkou plastifikační přísady, která měla za následek snížení množství vlhkosti. U samozhutnitelných zálivek se tedy, stejně jako u předchozího písčitého jílu saCl, osvědčilo použití plastifikačních přísad v množství 3,0 %.

Pevnosti v tlaku se zároveň u samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, jak můžeme vidět v Přílohách č. 27 k), l) zvyšovaly s vyšší dávkou cementu (6 % a 8 %) a zvyšujícím se množstvím plastifikační přísady. Nejvyšších pevností v tlaku (až 0,4 MPa po 28 dnech zrání) tak bylo dosaženo u samozhutnitelných zálivek obsahujících 8 % cementu a 3,0 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062 (viz Příloha č. 27 l)). Dosažení požadovaných pevností v tlaku (0,2 MPa po 28 dnech zrání) bylo ovšem dosaženo i při přidavku cementu v množství 4 %. Z tohoto pohledu je tedy vhodné volit množství přidavku cementu k samozhutnitelným zálivkám vždy s ohledem na dosažení požadovaných výsledných pevností.

4.3.3.4. Stanovení smrštění a vlhkosti



Obr. 100. Závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % cementu a 1 - 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062

Na Obr. 100 a v Přílohách č. 15 m) až p) jsou uvedeny výsledné hodnoty závislosti smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % (až 8 %) cementu a 1-3 % plastifikačních přísad (Sika ViscoCrete – 21, Sika ViscoCrete – 4088 a Sika ViscoCrete – 1062). Obr. 100 uvádí závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % cementu a 0-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062. V Přílohách č. 27 m) a n) jsou uvedeny výsledné hodnoty závislosti smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, která pro srovnání, mimo jiné, obsahovala 1 – 3 % plastifikačních přísad Sika ViscoCrete – 21, Sika ViscoCrete – 4088. V Příloze č. 15 o) a p) můžeme vidět výsledné hodnoty pevností v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, u které byl ověřován vliv vyšší dávky cementu (6 % a 8 %) spolu v kombinaci s 1 – 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062.

Z výsledků hodnot smrštění samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % cementu a 1 – 3 % plastifikačních přísad (Sika ViscoCrete – 21, Sika ViscoCrete – 4088 a Sika ViscoCrete – 1062) lze konstatovat, že nejmenšího smrštění (0,2 %) bylo dosaženo při přidavku plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 4088 a Sika ViscoCrete – 1062 v množství 3,0 %. Vliv plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 4088,

ve srovnání s ostatními druhy nebyl tak výrazný. Tento fakt souvisel s reakcí písčité zeminy fgrCSa a pojivy, které se při přidavku plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 4088 výrazně neměnily. Obecně lze ale konstatovat, že všechny druhy přísad redukovaly množství vody potřebné pro získání optimálního rozlití, což se s odstupem času projevilo i na hodnotách smrštění. Při sledování účinku plastifikačních přísad lze vidět (Obr. 100, Přílohy č. 27 m), n)), že se smrštění snižovalo se zvyšující se dávkou plastifikační přísady. Stejně jako tomu bylo u předchozích výsledků (stanovení rozlití, pevnosti v tlaku) i zde se jevílo jako optimální použití plastifikačních přísad v množství 3,0 % pro zlepšení parametru smrštění.

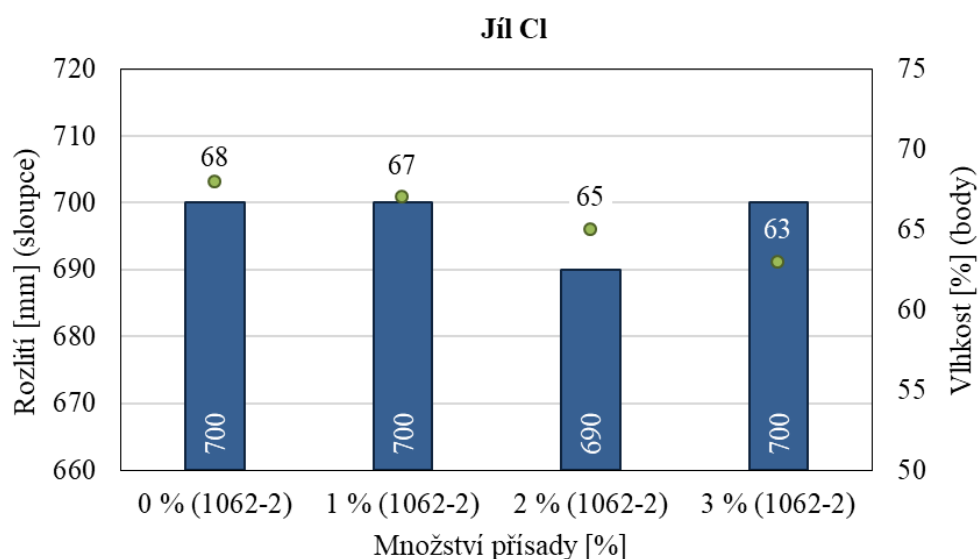
Jak je vidět z Obr. 100 a Příloh 27 o) a p) hodnoty smrštění se zároveň snižovaly se zvyšující se dávkou cementu. Cement se v případě písčité zeminy fgrCSa jevíl jako účinný stabilizátor, který byl zároveň i nositelem pevnosti. Přidavkem plastifikační přísady Sika ViscoCrete 1062 k zálivkám, bylo zároveň sníženo potřebné množství vody pro získání směsi optimální konzistence, což se projevilo i na snížení výsledných hodnot smrštění. Nejnížší hodnoty smrštění (0,1 % po 28 dnech zrání) tak bylo dosaženo u samozhutnitelné zálivky na bázi písčité zeminy fgrCSa, obsahující 1,5 % vápna 8 % cementu a 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062. Obecně lze konstatovat, že se hodnoty smrštění mírně zvyšovaly v čase, což bylo způsobeno odcházející vodou ze směsi v průběhu zrání (po 7, 14, 28 a 90 dnech).

4.3.4 Sledování vlivu plastifikačních a ztekucujících přísad na jíl Cl

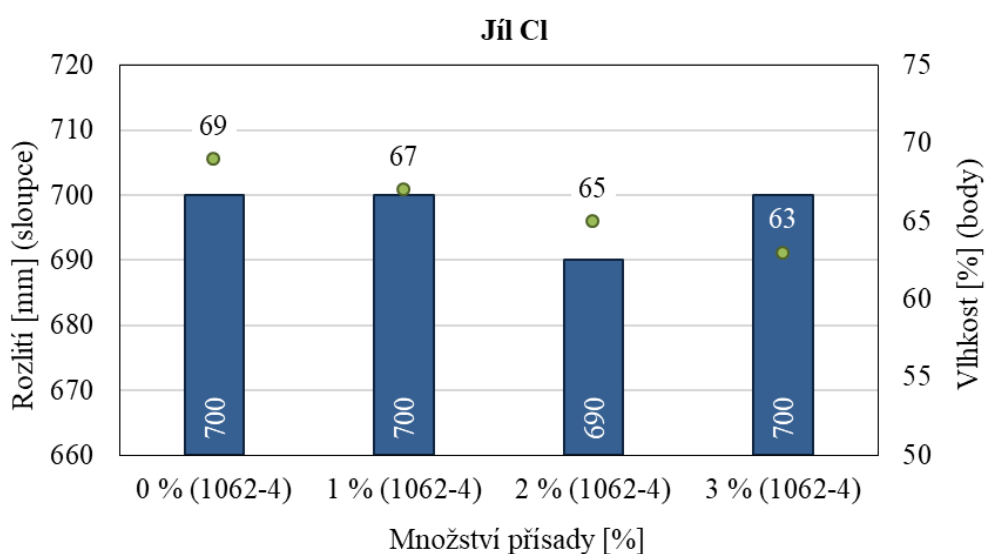
V předchozím textu byly ověřovány receptury samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl a písčité zeminy fgrCSa. Na základě výzkumných prací bylo zjištěno, že přidavkem určitých druhů a množství přísad k daným typům zemin bylo dosaženo zlepšení požadovaných parametrů zálivek, především pak hodnot rozlití, pevnosti v tlaku a smrštění. Účinek jednotlivých druhů přísad k zeminám se odvíjel především od mineralogického složení zemin a zároveň v souvislosti s druhem a množstvím použitého pojiva (především cementu). U písčitého jílu se pro dosažení zlepšení výše uvedených parametrů osvědčilo, z hlediska přísad, použití uhličitanu sodného v množství 0,08 % (z hmot. zeminy) a 3,0 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062 (z hmot. cementu). Pro zlepšení parametrů samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa se jako optimální jevílo použití plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062 v množství 3,0 % (z hmot. cementu). Na základě zjištěných parametrů a s ohledem na mineralogické složení jílu Cl bylo pro zlepšení parametrů samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl navrženo použití ztekucující přísady uhličitanu sodného v množství 0,08 %. Vzhledem k obsahu jílovitých jemnozrnných částic

($f = 96,99 \%$) lze předpokládat vzájemnou synergii této přísady spolu s minerály obsaženými v jílu. Stejně jako tomu bylo prokázáno u písčitého jílu saCl. Pro zjištění účinku plastifikačních přísad na jíl Cl bylo pro návrh receptur také zvoleno použití plastifikační přísady Sika ViscoCrete v množství 3,0 % (z hmot. cementu). Vzhledem k tomu, že tato přísada, jak bylo zjištěno dříve, reaguje spíše s cementem než s jílovými minerály, byla ověřována se zvyšující se dávkou cementu (2 – 8 %).

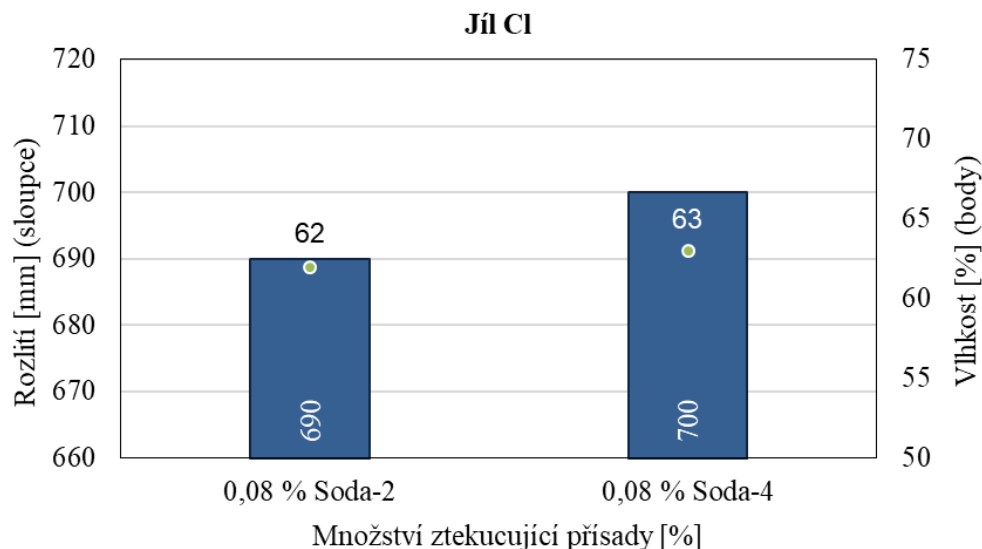
4.3.4.1. Stanovení sednutí-rozlítí



Obr. 101. Závislost rozliti na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 2 % cementu, 0–3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



Obr. 102. Závislost rozliti na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi Cl, 3,0 % vápna, 4 % cementu, 0–3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



Obr. 103. Závislost rozlití na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 2 a 4 % cementu, 0,08 % uhličitanu sodného

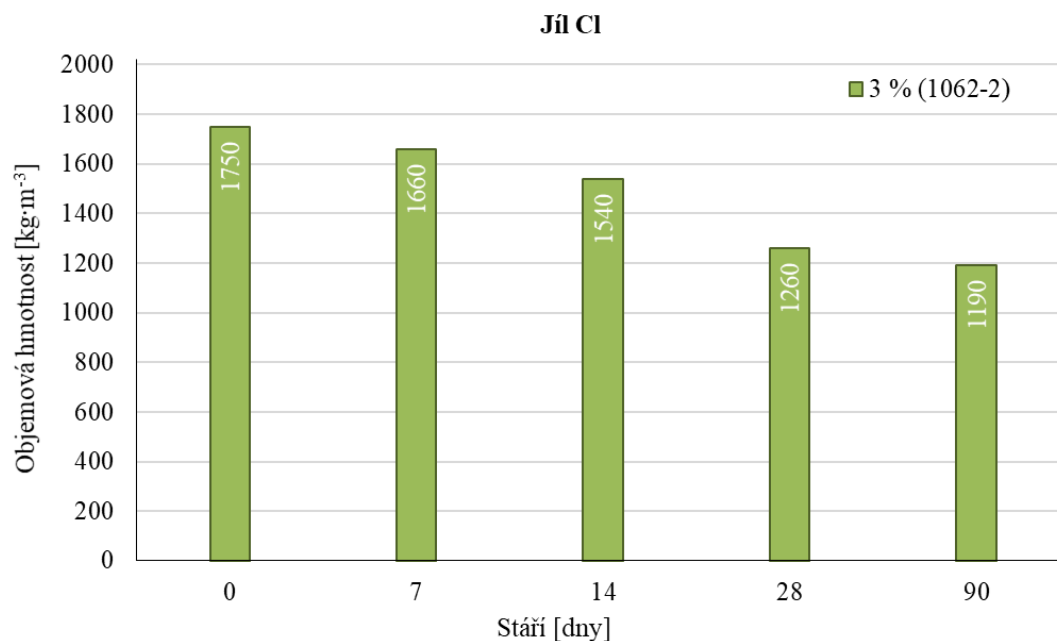
Na Obr. 101 až Obr. 103 a v Přílohách č. 28 a) a b) jsou uvedeny výsledné hodnoty závislosti rozlití na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi Cl, 3,0 % vápna, 2 % až 8 % cementu, 0-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062 a 0,08 % ztekucující přísady uhličitanu sodného. Na Obr. 101 je uvedena závislost rozlití na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 2 % cementu, 0 - 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062. Na dalším grafu (Obr. 102) je uvedena závislost rozlití na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, obsahujících 3,0 % vápna, 4 % cementu, 0-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062. V Přílohách č. 28 a) a b) jsou uvedeny závislosti rozlití na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl se zvýšenou dávkou cementu (6 % a 8 %). Obr. 103 znázorňuje závislost rozlití na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 2 a 4 % cementu, 0,08 % uhličitanu sodného.

Při sledování účinku plastifikační přísady SikaViscoCrete – 1062 na samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl (Obr. 101 a Obr. 102, Přílohy č. 28 a), b)) lze konstatovat, že účinek této přísady se projevuje se zvyšujícím se množstvím této přísady a zároveň se zvyšujícím se množstvím cementu. Zvyšující se dávka cementu (především 6 % a 8 %) měla za následek mírné zvýšení potřebného množství vody pro hydrataci, což bylo nerelevantní z hlediska sledování hodnoty rozlití. Na základě této reakce nebylo možné objektivně sledovat vliv plastifikační přísady. Nicméně i přes to lze na základě dosažených výsledků konstatovat,

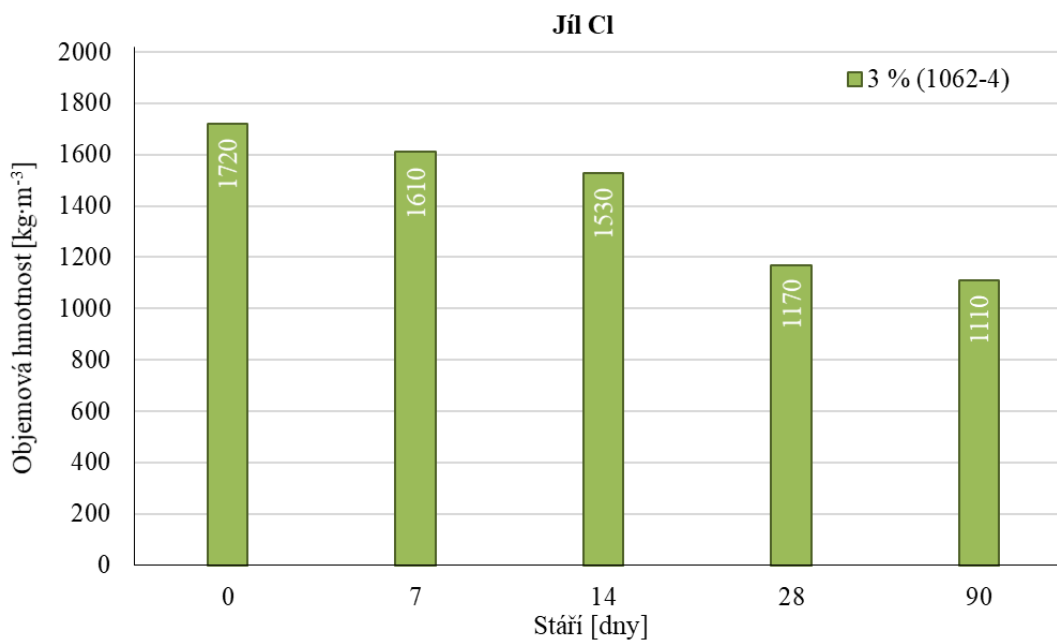
že bylo prokázáno, stejně jako u písčité zeminy fgrCSa, že docházelo ke zvyšování hodnoty rozlití se zvyšující se dávkou cementu a plastifikační přísady. Ovšem pouze v případě přidavku cementu do 4 %. Nejvyššího rozlití (700 mm, při vlhkosti 63 %) tak bylo dosaženo u samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl, obsahující 3,0 % vápna, 4 % cementu a 3 % plastifikační přísady SikaViscoCrete – 1062.

Při porovnání účinku plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1060 (Obr. 101 a Obr. 102, Přílohy č. 28 a), b)) v množství 3,0 % (z hmot. cementu) a uhličitanu sodného (Obr. 103) v množství 0,08 % (z hmot. zeminy) lze konstatovat, že větší účinek měl na hodnotu rozlití uhličitan sodný. Na základě zjištěných poznatků o účinku plastifikační přísady SikaViscoCrete – 1062 jsou dále v grafech uvedeny pouze hodnoty samozhutnitelných zálivek s přidavkem pouze 3 % (z hmot. cementu) této přísady. Při použití uhličitanu sodného bylo zároveň dosaženo snížení potřebného množství vody na hodnotu 62 % (při použití cementu v množství 2 %) a 63 % (při použití cementu v množství 4 %) pro získání optimální hodnoty rozlití (690 mm – 62 %, 700 mm – 63 %). Na základě dosažených výsledků lze tedy konstatovat, že pro ztekucení samozhutnitelných zálivek se projevilo jako účinnější použití ztekucující přísady uhličitanu sodného v množství 0,08 %, než plastifikační přísada SikaViscoCrete – 1062. Principem reakce uhličitanu sodného spolu s jílem Cl bylo, stejně jako u předchozího písčitého jílu saCl, vytvoření záporného náboje kolem jílovitých minerálů, který má rozhodující vliv na chování zálivky. Náboj jílovitých částic byl příčinou adsorpce vodních molekul, které vytvářely kolem jílovitých částic vodní film, čímž docházelo k většímu rozlití zálivek.

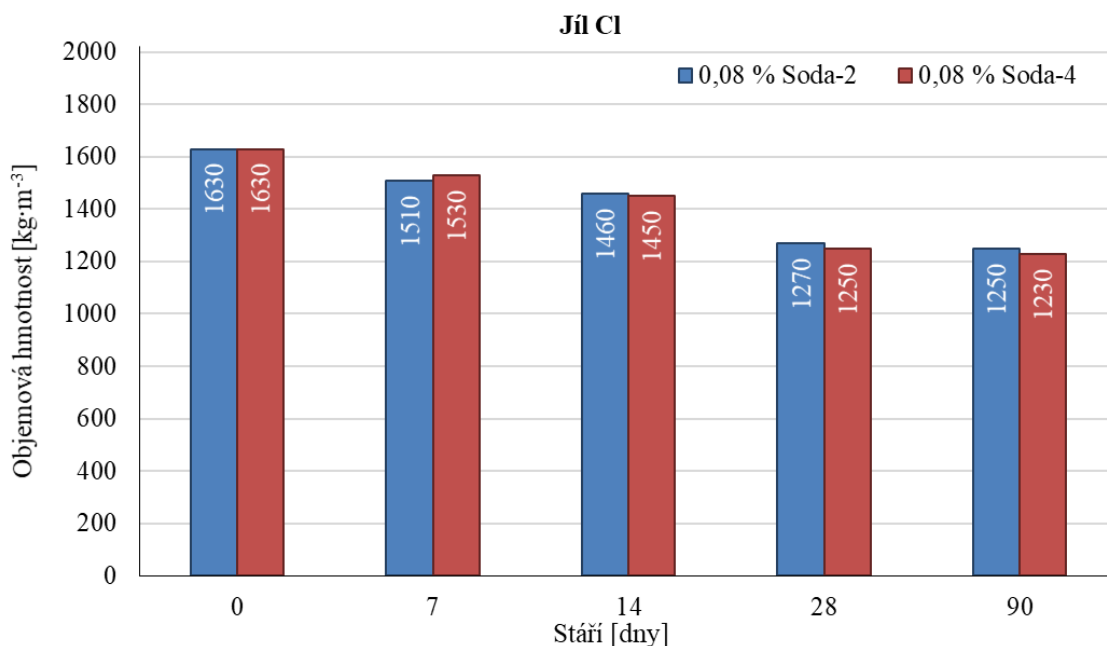
4.3.4.2. Stanovení objemové hmotnosti



Obr. 104. Objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu CI, 3,0 % vápna, 2 % cementu, 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



Obr. 105. Objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu CI, 3,0 % vápna, 4 % cementu, 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



Obr. 106. Objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 2 a 4 % cementu, 0,08 % uhličitanu sodného

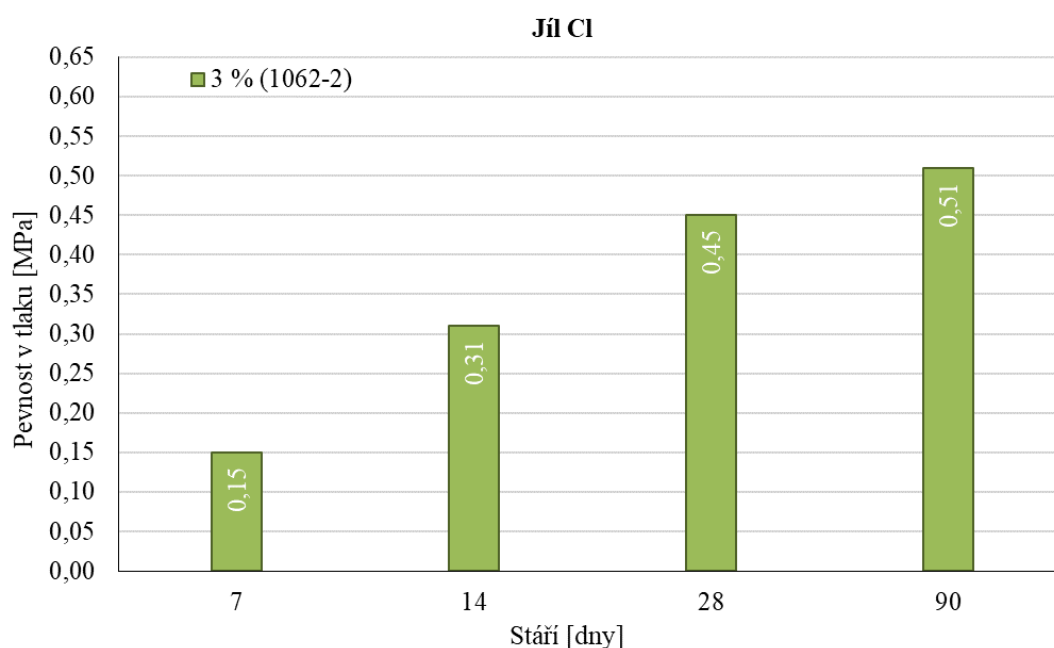
Na Obr. 104 až Obr. 106 a v Přílohách č. 28 c) a d) jsou uvedeny výsledné hodnoty objemových hmotností samozhutnitelných zálivek na bázi Cl, 3,0 % vápna, 2 % až 8 % cementu, 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062 a 0,08 % ztekucující přísady uhličitanu sodného. Na Obr. 104 jsou uvedeny objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 2 % cementu, 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062. Na dalším grafu (Obr. 105) jsou uvedeny výsledné hodnoty objemových hmotností samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, obsahujících 3,0 % vápna, 4 % cementu, 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062. V Přílohách č. 28 c) a d) jsou uvedeny objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl se zvýšenou dávkou cementu (6 % a 8 %). Obr. 106 uvádí výsledky objemových hmotností samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 2 a 4 % cementu, 0,08 % uhličitanu sodného.

Z výsledků objemových hmotností samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 2 %, 4 % (6 %, 8 %) cementu, 0,08 % uhličitanu sodného a 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete 1062 (Obr. 104 až Obr. 106, Přílohy č. 28 c), d)) lze vidět, že se objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek mírně snižovaly se zvyšující se dávkou cementu, ovšem pouze do hodnoty 4 %. Poté docházelo k nárůstu těchto hodnot. Změny objemových hmotností byly ovlivněny přidávkou plastifikační přísady a cementu,

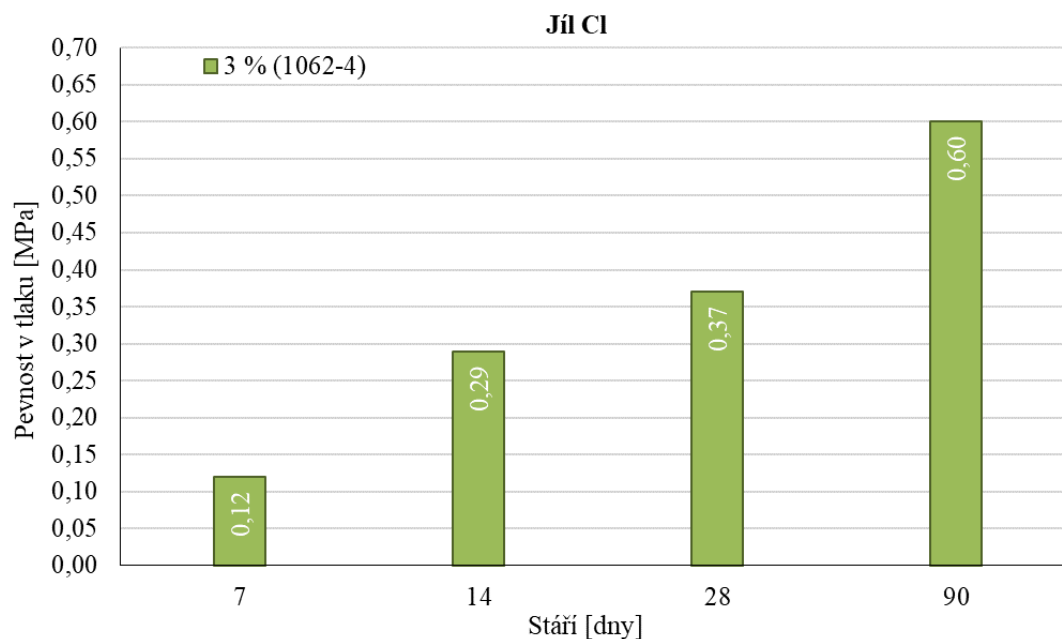
jež měly za následek přidavek určitého množství vody pro získání optimální hodnoty rozlití zálivky již v čerstvém stavu. Přídavek vody, pojiv a přísad vedl k nahrazení primární suroviny, kterou byla jílovitá zemina, čímž došlo ke snížení objemových hmotností zálivek.

Výraznější snížení objemových hmotností bylo zaznamenáno u samozhutnitelných zálivek obsahujících ztekucující přísadu uhličitan sodný v množství 0,08 (z hmot. zeminy) (viz Obr. 106). Tento fakt byl zaznamenán především u zálivek v čerstvém stavu a po 14 dnech zrání. Po 28 dnech byly objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek téměř srovnatelné. V čerstvém stavu byl u samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl obsahujících uhličitan sodný v množství 0,08 % (z hmot. zeminy) zaznamenán vznik pórovitější struktury, což mohlo vést ke snížení objemových hmotností. Obecně se objemové hmotnosti všech zálivek snižovaly v průběhu zrání zálivek (po 7, 14, 28 a 90 dnech), což bylo způsobeno odcházející vodou.

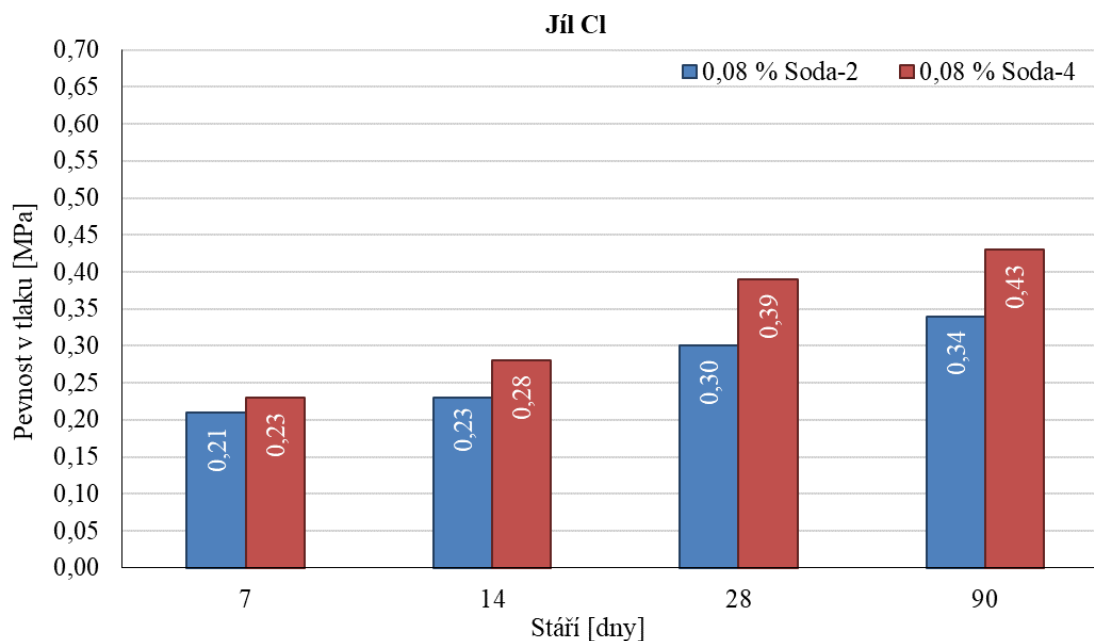
4.3.4.3. Stanovení pevnosti v tlaku



Obr. 107. Pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 2 % cementu, 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



Obr. 108. Pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi jílu CI, 3,0 % vápna, 4 % cementu, 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



Obr. 109. Pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi jílu CI, 3,0 % vápna, 2 a 4 % cementu, 0,08 % uhličitanu sodného

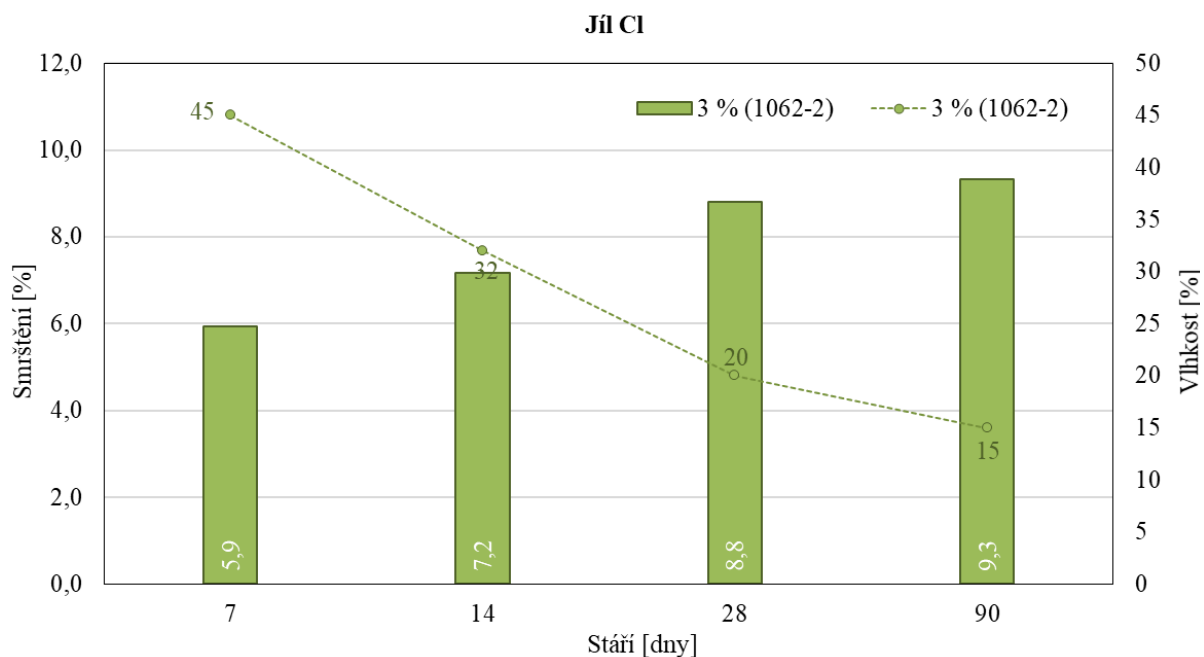
Na Obr. 107 až Obr. 109 a v Přílohách č. 28 e) a f) jsou uvedeny výsledné hodnoty pevností v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi jílu CI, 3,0 % vápna, 2 % až 8 % cementu, 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062 a 0,08 % ztekucující přísady uhličitanu

sodného. Na Obr. 107 jsou uvedeny pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 2 % cementu, 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062. Na dalším grafu (Obr. 108) jsou uvedeny výsledné hodnoty pevností v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, obsahujících 3,0 % vápna, 4 % cementu, 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062. V Přílohách č. 28 e) a f) jsou uvedeny pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl se zvýšenou dávkou cementu (6 % a 8 %). Obr. 109 ukazuje pevnost v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 2 a 4 % cementu, 0,08 % uhličitanu sodného.

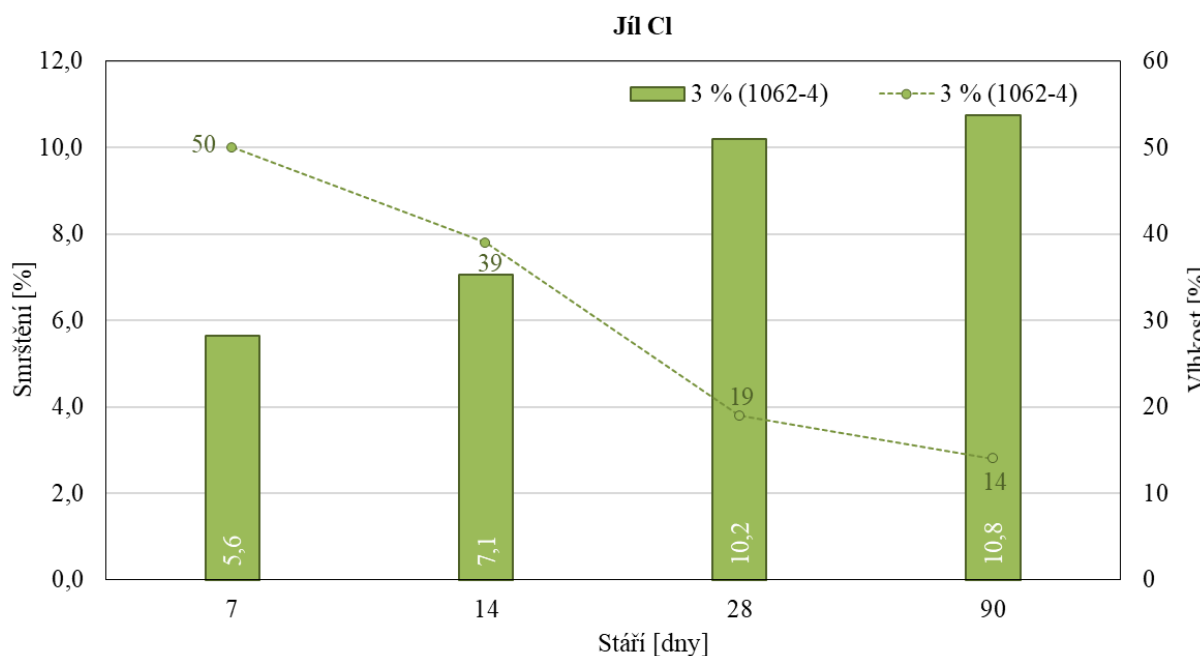
Z výsledků pevností v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 2 %, 4 %, (6 % a 8 %) cementu, 0,08 % uhličitanu sodného a 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete 1062 (Obr. 107 až Obr. 109, Přílohy č. 28 e), f)) bylo zjištěno, že se obecně pevnosti zvyšovaly se zvyšující se dávkou cementu. Tento fakt se projevil jak při použití plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062 v množství 3,0 % (z hmot. cementu), tak při použití ztekucující přísady uhličitanu sodného v množství 0,08 % (z hmot. zeminy). Na základě výsledných hodnot samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, při porovnání účinku plastifikačních a ztekucujících přísad na hodnotu pevnosti v tlaku, bylo zjištěno, že větší vliv na tuto hodnotu měla ztekucující přísada uhličitan sodný v množství 0,08 % (z hmot. zeminy). Zvýšení pevnosti v tlaku bylo dále ještě zaznamenáno se zvyšující se dávkou cementu. Jak tedy můžeme vidět na Obr. 109 nejvyšší hodnoty pevnosti v tlaku (0,39 MPa, po 28 dnech zrání) bylo dosaženo u samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl, obsahující 3,0 % vápna, 4 % cementu a 0,08 % uhličitanu sodného.

Při srovnání pevností v tlaku zálivek na bázi jílovité zeminy saCl a jílu Cl lze konstatovat, že vyšších hodnot bylo dosaženo u samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl navíc v kombinaci s použitím uhličitanu sodného v množství 0,08 % a cementu v množství 4 %. Z toho lze usuzovat, že tato ztekucující přísada velmi ochotně reaguje s jílovitými minerály obsaženými v zemině. Účinek plastifikační přísady Sika ViscoCrete výrazně hodnoty pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl nezvyšoval, proto se z hlediska parametru pevnosti v tlaku nejví jeho použití jako optimální.

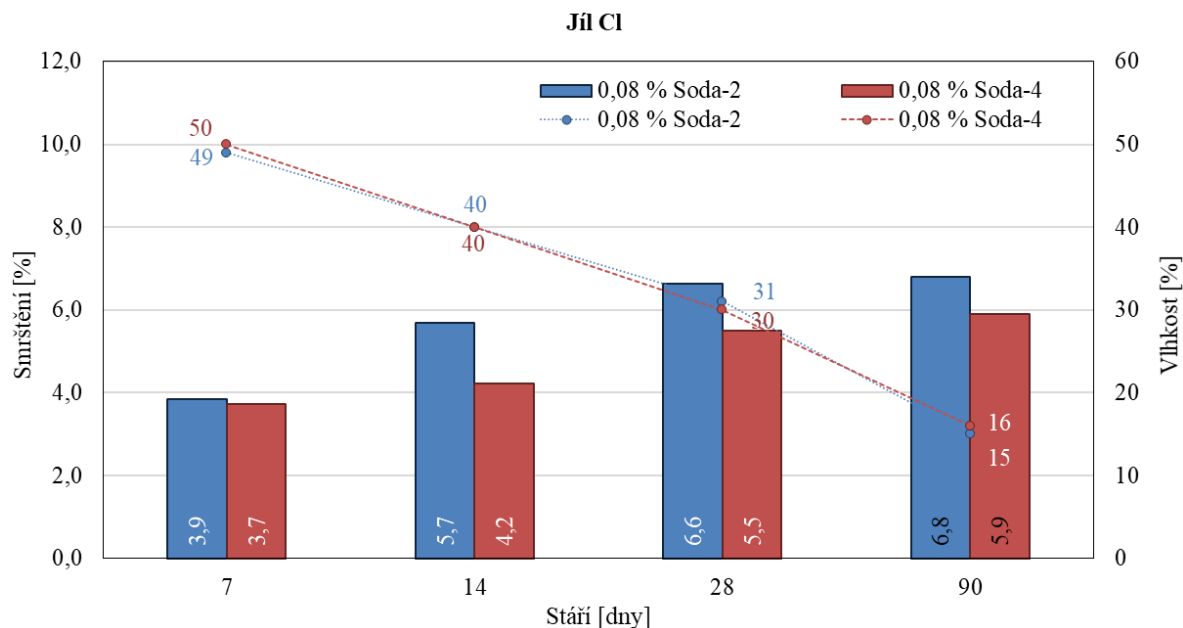
4.3.4.4. Stanovení smrštění a vlhkosti



Obr. 110. Závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu C1, 3,0 % vápna, 2 % cementu, 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



Obr. 111. Závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu C1, 3,0 % vápna, 4 % cementu, 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



Obr. 112. Závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 2 a 4 % cementu, 0,08 % uhličitanu sodného

Na Obr. 110 až Obr. 112 a v Přílohách č. 28 g) a h) jsou uvedeny výsledné hodnoty závislosti smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 2 % až 8 % cementu, 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062 a 0,08 % ztekucující přísady uhličitanu sodného. Na Obr. 110 je uvedena závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 2 % cementu, 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062. Na dalším grafu (Obr. 111) jsou uvedeny výsledné hodnoty závislosti smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, obsahujících 3,0 % vápna, 4 % cementu, 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062. V Přílohách č. 28 e) a f) jsou uvedeny závislosti smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl se zvýšenou dávkou cementu (6 % a 8 %). Obr. 112 ukazuje závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 2 a 4 % cementu, 0,08 % uhličitanu sodného.

Z předchozího výzkumu, provedeného v rámci II Etapy, bylo zjištěno, že samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl, díky vysokému obsahu jemnozrnných jílovitých částic, dosahují nejvyšších hodnot smrštění. Tento jev byl způsoben tím, že jílovité částice měly tendenci na sebe vázat velké množství vody, které postupem času ze směsi odcházelo a způsobovalo narůstající smrštění. V rámci II Etapy bylo snahou tento fakt eliminovat pomocí použití stabilizačních činidel (3,0 % vápna, 2 % a 4 % cementu). V rámci výzkumných prací

III Etapy bylo snahou nejen parametr smrštění, ale i ostatní vlastnosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl upravit tak, aby bylo dosaženo jejich zlepšení.

Na základě výsledných hodnot smrštění samozhutnitelných zálivek (Obr. 110 až Obr. 112 a v Přílohách č. 28 g) a h)) obsahujících plastifikační přísadu Sika ViscoCrete – 1062 v množství 3,0 % a ztekucující přísadu uhličitán sodný v množství 0,08 %, lze konstatovat, že bylo dosaženo snížení parametru smrštění až o cca 5 %.

Dosažení eliminace smrštění, jak můžeme vidět na Obr. 110 až Obr. 112 a v Přílohách č. 28 g), h), bylo především ovlivněno přidavkem ztekucující přísady uhličitánu sodného v množství 0,08 % (z hmot. zeminy), což mělo za následek snížení vlhkosti v zálivkách, a to jak v čerstvém, tak v zatvrdlém stavu. Snížení smrštění bylo dále zaznamenáno se zvyšující se dávkou cementu. Pomocí ztekucující přísady uhličitánu sodného v množství 0,08 %, který byl přidán k samozhutnitelné zálivce na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna a 4 % cementu bylo dosaženo smrštění po 28 dnech zrání 5,5 %. Obecně se hodnoty smrštění zvyšovaly s odstupem času (po 7, 14, 28 a 90 dnech zrání), což bylo způsobeno odcházející vodou ze směsí. Snížení smrštění samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl s přidavkem plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062 v množství 3,0 % (z hmot. cementu) bylo ovlivněno spíše přidavkem cementu. Na základě zjištěných výsledků lze tedy konstatovat, že pro snížení smrštění se jako účinnější jevílo použití ztekucující přísady uhličitánu sodného než plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062.

Na vybraných samozhutnitelných zálivkách byla zároveň provedena rastrovací elektronová mikroskopie. Snímky provedené z této analýzy jsou uvedeny v Příloze č. 29 a), b) a c). Na snímcích z elektronové mikroskopie byl viditelný vznik tzv. „gelů“, které vznikaly reakcí plastifikačních a ztekucujících přísad spolu s dalšími složkami obsaženými v zálivkách. U samozhutnitelné zálivky na bázi písčitého jílu saCl, byla zaznamenána především synergická reakce cementu spolu s plastifikační přísadou Sika ViscoCrete – 1062. A u samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl byla zaznamenána synergická reakce uhličitánu sodného spolu s jílovými minerály.

4.3.5 Sledování vlivu vedlejších energetických produktů na samozhutnitelné zálivky

V rámci výzkumných prací III Etapy disertační práce bylo zároveň provedeno pilotní ověření účinku vedlejších energetických produktů (fluidního popílku (FA)) na výsledné vlastnosti samozhutnitelných zálivek. U vedlejších energetických produktů

se očekávalo, že by mohly mít vliv na úpravu vlastností samozhutnitelných zálivek jak v čerstvém, tak v zatvrdlém stavu. Především se u fluidního popílku (FA) předpokládal účinek volného vápna na stabilizaci směsi, zvýšení pevnosti v tlaku a snížení smrštění.

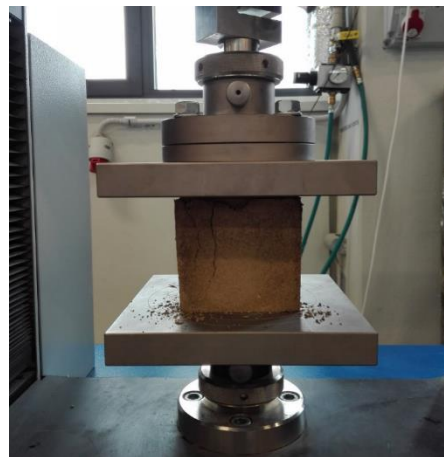
Pro experimentální činnost byl použit písčitý jíl saCl z oblasti Brno – Medlánky. Jako částečná náhrada zeminy (písčitého jílu saCl), byl použit fluidní popílek (FA) z elektrárny Tisová. Množství fluidního popílku, které se v rámci výzkumných prací ověřovalo bylo 5 %, 10 %, 30 % a 60 % (z hmot. zeminy). Zároveň bylo při návrhu receptur zvoleno použití cementu CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R v množství 4 % (z hmot. zeminy) od společnosti Českomoravský cement, a.s. z Mokrě. Vápno pro návrh směsi nebylo použito, protože se předpokládal určitý obsah vápna v použitém fluidním popílku. Na základě použitých surovin byly navrženy následující receptury:

- písčitý jíl saCl (REF),
- písčitý jíl saCl + 4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R,
- písčitý jíl saCl + 5 % fluidního popílku (FA),
- písčitý jíl saCl + 5 % fluidního popílku (FA) + 4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R,
- písčitý jíl saCl + 10 % fluidního popílku (FA),
- písčitý jíl saCl + 10 % fluidního popílku (FA) + 4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R
- písčitý jíl saCl + 30 % fluidního popílku (FA),
- písčitý jíl saCl + 30 % fluidního popílku (FA) + 4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R,
- písčitý jíl saCl + 60 % fluidního popílku (FA),
- písčitý jíl saCl + 60 % fluidního popílku (FA) + 4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R.

U samozhutnitelných zálivek, ve kterých byl použit fluidní popílek, byly provedeny pouze nejdůležitější zkoušky, kterými je stanovení rozlití a pevnosti v tlaku. Stanovení sednutí-rozlitím bylo provedeno pomocí Abrams kužele (Obr. 113) dle normy ČSN EN 12350-8. Pevnost v tlaku byla provedena podle normy ČSN EN 12390-3 na zkušebních tělesech o rozměru 100 x 100 x 100 mm (Obr. 114). Zkoušky pevnosti v tlaku byly prováděny po 7 dnech zrání vzorků. Výsledky zkoušek jsou uvedeny na Obr. 115 a Obr. 116.

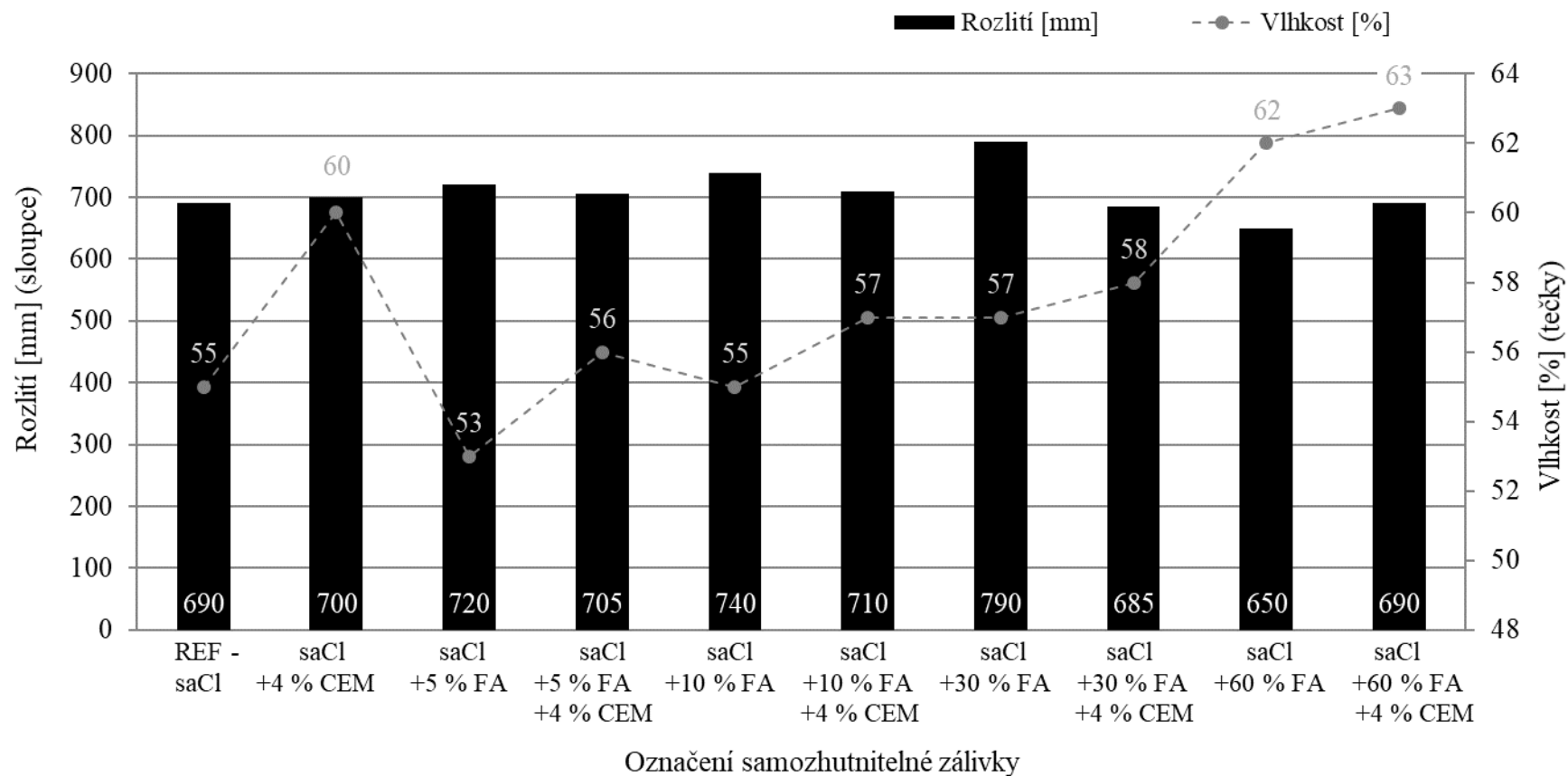


Obr. 113. Stanovení sednutí-rozlitím
dle ČSN EN 12350-8



Obr. 114. Stanovení pevnosti v tlaku
dle ČSN EN 12390-3

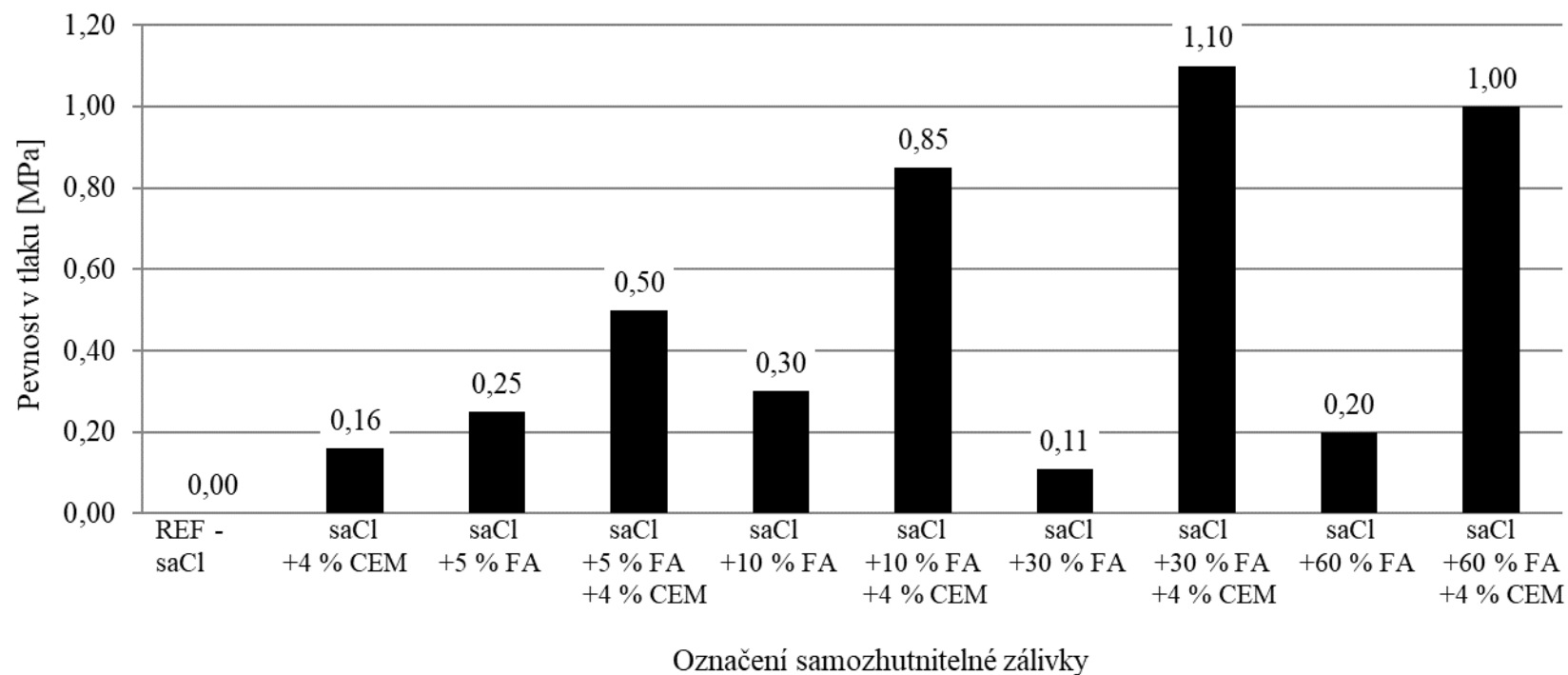
Z výsledků hodnot zkoušky rozlití lze vidět (Obr. 115), že přidavek fluidního popílku k zemině ovlivňoval reologické vlastnosti směsi. Tento fakt byl zřejmý již při přidavku 5 % fluidního popílku k zemině. U této samozhutnitelné zálivky, obsahující 5 % fluidního popílku, bylo dosaženo rozlití 720 mm (SF2) při vlhkosti 53 %. Při srovnání s referenční samozhutnitelnou zálivkou tak došlo k většímu rozlití (o 30 mm) při menším množství vlhkosti (o 2 %). U zálivky, která obsahovala fluidní popílek v množství 10 %, se hodnota rozlití zvýšila na 740 mm (SF2, při vlhkosti 55 %). Přídavkem fluidního popílku v množství 30 % (z hmot. zeminy) výrazně zvyšoval hodnotu rozlití směsi na 790 mm (SF3, při vlhkosti 57 %), ve srovnání s referenční zeminou (690 mm, SF2, při vlhkosti 55 %). Přídavkem fluidního popílku v množství 60 % naopak hodnotu rozlití snižoval (650 mm, SF1, při vlhkosti 62 %). Tento jev byl ovlivněn přítomností CaO v popílku, který okamžitě reagoval s přidanou vodou. Obecně lze konstatovat, že přidavkem popílku ke směsi, především pak v množství do 30 %, došlo ke zlepšení reologických vlastností a ke stabilizaci směsi. U směsí, ve kterých byl přítomný popílek, byla zároveň snížena dekantace (odstoj vody). Z těchto výsledků lze usuzovat, že popílek ve směsi působil jako účinný stabilizátor.



Obr. 115. Závislost rozliti na vlhkosti samozhutnitelných zálivek s použitím fluidního popílku

Jistou funkci, při hodnocení reologických vlastností směsi, zároveň sehrál cement. Cement ochotně reagoval s písčítým jílem saCl. V čerstvém stavu se cement projevoval jako účinný stabilizátor zeminy, zejména tím, že snižoval sedimentaci částic při míchání směsi. Z Obr. 115 můžeme vidět, že přítomnost cementu mohla snižovat hodnotu rozlité (saCl + 5 % FA + 4 % CEM = 705 mm, SF2, při vlhkosti 56 %; saCl + 10 % FA + 4 % CEM = 710 mm, SF2, při vlhkosti 57 %; saCl + 30 % FA + 4 % CEM = 685 mm, SF2, při vlhkosti 58 %; saCl + 60 % FA + 4 % CEM = 690 mm, SF2, při vlhkosti 63 %), protože při smíchání vody s cementem, popínkem a písčítým jílem saCl okamžitě došlo k hydrataci. Ovšem v případě navržených samozhutnitelných zálivek měl na hodnotu rozlité spíše vliv fluidní popínky než cement. Cement spolu s písčítým jílem saCl a vodou reagoval za vzniku hydratačních produktů (rozpustných gelů), které postupem času krystalovaly a vytvářely propletenou mřížku, což se projevilo i na výsledných pevnostech vzorků.

Z Obr. 116 můžeme vidět, že pevnost v tlaku u písčitého jílu saCl, po 7 dnech zrání, nebyla stanovena. To bylo způsobeno tím, že vzorky byly po sedmi dnech stále příliš vlhké na to, aby se na nich mohla stanovit hodnota pevnosti v tlaku. Proto byly výsledky pevností v tlaku srovnávány především se samozhutnitelnou zálivkou na bázi písčitého jílu saCl a 4 % cementu. Při hodnocení pevnosti v tlaku můžeme z Obr. 116 vidět, že s přibývajícím množstvím popínku, docházelo ke zvyšování hodnoty pevnosti v tlaku, ovšem pouze do hodnoty 10 %. Vyšší dávka fluidního popínku (30 % a 60 %) hodnoty pevnosti v tlaku naopak snižovala. Přídavkem 5 % fluidního popínku k písčitému jílu saCl bylo dosaženo pevnosti v tlaku 0,25 MPa, po 7 dnech zrání a při přídavku 10 % fluidního popínku k písčitému jílu saCl bylo dosaženo pevnosti v tlaku 0,3 MPa (po 7 dnech zrání). Přídavek 30 % fluidního popínku k zemině vedl ke snížení hodnoty pevnosti v tlaku na 0,11 MPa, ve srovnání se samozhutnitelnou zálivkou složenou z písčitého jílu saCl a 4 % cementu (0,16 MPa, po 7 dnech zrání). Při přídavku 60 % fluidního popínku k zemině byla pevnost v tlaku po 7 dnech zrání 0,2 MPa. Snížení pevnosti v tlaku s přibývajícím množstvím popínku bylo způsobeno vytvářením méně pevných vazeb mezi fluidním popínkem a zeminou.



Obr. 116. Pevnosti v tlaku samozhutnitelných záливок s použitím fluidního popílku, po 7 dnech zrání

Zároveň přítomnost CaO v popílku mohla hodnoty pevnosti v tlaku směsí mírně zvyšovat, ovšem tento jev se výrazně neprojevil. Ve srovnání samozhutnitelné zálivky složené z písčitého jílu saCl a 4 % cementu, se zálivkou navíc obsahující 5 %, 10 % a 30 % fluidního popílku, lze konstatovat, že s přibývajícím dávkou popílku (do 30 %) se hodnoty pevnosti v tlaku zvyšovaly. Při přidavku 5 % fluidního popílku k samozhutnitelné zálivce na bázi písčitého jílu saCl a 4 % cementu bylo dosaženo pevnosti v tlaku 0,5 MPa, po 7 dnech zrání. 10% přídavek fluidního popílku k samozhutnitelné zálivce na bázi písčitého jílu saCl a 4 % cementu pevnost v tlaku zvýšil na hodnotu 0,85 MPa (po 7 dnech zrání). Značné zvýšení hodnoty pevnosti v tlaku na 1,1 MPa bylo znatelné při použití 30 % fluidního popílku k písčitému jílu saCl (saCl + 30 % FA + 4 % CEM). U samozhutnitelné zálivky složené z písčitého jílu saCl, 60 % FA a 4 % CEM byla hodnota pevnosti v tlaku po 7 dnech zrání 1,0 MPa. Při sledování parametru pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 4 % cementu a fluidního popílku (v množství 5 %, 10 %, 30 % a 60 %) lze konstatovat, že zvýšení hodnot pevnosti v tlaku bylo ovlivněno především přítomností cementu.

Na základě dosažených hodnot rozlití a pevnosti v tlaku lze konstatovat, že pro zlepšení těchto parametrů se jako optimální jeví použití fluidního popílku v množství do 10 %. Vyšší dávka fluidního popílku (30 % a 60 %) sice zlepšovala parametr rozlití, ovšem snižovala hodnotu pevnosti v tlaku. Tento fakt byl způsoben tím, že fluidní popílek vytvářel spolu se zeminou méně pevné vazby, což vedlo ke snižování pevnosti v tlaku. Nižší dávka fluidního popílku (do 10 %) v samozhutnitelné zálivce má zároveň pozitivnější dopad na ekologické parametry (ekotoxicitu a vyluhovatelnost).

4.3.6 Stanovení dob tuhnutí na vybraných směsích

V rámci výzkumných prací III Etapy disertační práce bylo zároveň provedeno ověření účinku plastifikačních a ztekucujících přísad a příměsí (fluidního popílku) na stanovení dob tuhnutí samozhutnitelných zálivek. V rámci II Etapy byly tyto zkoušky provedeny na vybraných směsích, u kterých se počátek tuhnutí projevil nejdříve za 9,25 hod a konec tuhnutí za 41,25 hod (u samozhutnitelné zálivky na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % cementu). Experimentálně bylo zjištěno, že doby tuhnutí samozhutnitelných zálivek byly ovlivněny obsahem jemnozrnných jílovitých částic v zeminách, použitými pojivy a množstvím vody, které bylo v zálivce potřeba pro dosažení optimálního rozlití. Na základě dosažených parametrů počátku a konce tuhnutí bylo pro optimalizaci těchto dob

navrženo použití plastifikačních a ztekucujících přísad či příměsí, které by mohly mít za následek jejich zkrácení.

Vzhledem k dosaženým výsledkům výzkumných prací III Etapy bylo možné provést výběr optimálních samozhutnitelných záливоek, na kterých byla provedena zkouška stanovení počátku a konce tuhnutí. Výsledky stanovení dob tuhnutí na vybraných samozhutnitelných záливоkách jsou uvedeny v následující Tab. 25.

Tab. 25: Počátek a konec tuhnutí samozhutnitelných záливоek s použitím přísad a příměsí

Složení samozhutnitelné záливоey	Počátek tuhnutí [hod]	Konec tuhnutí [hod]
Písčitéý jíl saCl, 3,0 % vápná, 2 % cementu, 3 % Sika ViscoCrete – 1062	12,75	47,50
Písčitéý jíl saCl, 3,0 % vápná, 4 % cementu, 3 % Sika ViscoCrete – 1062	10,75	45,25
Písčitéý jíl saCl, 3,0 % vápná, 2 % cementu, 0,08 % uhličitan sodný	11,00	45,50
Písčitéý jíl saCl, 3,0 % vápná, 4 % cementu, 0,08 % uhličitanu sodného	9,75	41,25
Písčitéá zemina fgrCSa, 3,0 % vápná, 4 % cementu, 3 % Sika ViscoCrete – 1062	7,25	39,75
Jíl Cl, 3,0 % vápná, 2 % cementu, 0,08 % uhličitanu sodného	19,50	53,50
Jíl Cl, 3,0 % vápná, 4 % cementu, 0,08 % uhličitanu sodného	17,75	48,75
Písčitéý jíl saCl, 4 % cementu, 5 % fluidního popílku	6,25	28,25
Písčitéý jíl saCl, 4 % cementu, 10 % fluidního popílku	4,75	20,50

Experimentálně bylo stanoveno, že plastifikační a ztekucující přísady, stejně jako přídavek fluidního popílku, měly pozitivní vliv nejen na zlepšení parametru rozlití, pevnosti v tlaku, smrštění, ale i dob tuhnutí. Díky přísadám (plastifikačním a ztekucujícím) a fluidního popílku (FA) se doby tuhnutí zkrátily až o 3 hodiny. Tento jev byl způsoben tím, že přídavek přísad k samozhutnitelným záливоkám snižoval množství vody potřebné pro získání optimálního rozlití, což vedlo ke snížení dob tuhnutí. U samozhutnitelných záливоek, ve kterých byl přidán fluidní popílek, bylo zkrácení dob tuhnutí ovlivněno přítomností volného vápná a cementu, které spolu okamžitě reagovaly za vzniku hydratačních produktů, jež měli také vliv na zkrácení dob tuhnutí.

Jak můžeme vidět z Tab. 25, nejkratší doba počátku (6,25 hod – 5 % FA, 4,75 hod – 10 % FA) a konce (28,25 hod – 5 % FA, 20,50 hod – 10 % FA) tuhnutí byla naměřena u samozhutnitelných záливоek na bázi saCl, 4 % cementu a 5 – 10 % popílku.

Mírné zvýšení počátku (na 7,25 hod) a konce (na 39,75 hod) tuhnutí bylo naměřeno u samozhutnitelné zálivky na bázi písčité zeminy fgrCSa, 3,0 % vápna, 4 % cementu a 3,0 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062. Na doby tuhnutí u samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, měl kromě fluidního popílku vliv především druh použité přísady a množství cementu. Jak je vidět z Tab. 25 nejkratší doby počátku (9,75 hod) a konce (41,25 hod) tuhnutí bylo dosaženo u samozhutnitelné zálivky na bázi písčitého jílu saCl, obsahující 3,0 % vápna, 4 % cementu a 0,08 uhličitanu sodného. Nejdelší doba počátku (19,50 hod) a konce (53,50 hod) tuhnutí pak byla naměřena u samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 2,0 % cementu a 0,08 % uhličitanu sodného.

Vliv na dosažení zkrácení dob tuhnutí by mohla mít vyšší dávka plastifikačních či ztekucujících přísad, cementu, či volba jiného druhu cementu (např. CEM I 42,5 R). Tato úprava by měla za následek zvýšené ceny samozhutnitelných zálivek, na což je třeba brát ohled. Účinek zvýšení dávky přísad a cementu, nebo jiná volba druhu cementu by tak mohla být předmětem dalších výzkumných prací samozhutnitelných zálivek. Vzhledem k širokému záběru výzkumných prací na této disertaci, to již nebylo předmětem bádání.

Shrnutí

V předchozí Etapě II bylo zjištěno, že vhodnou volbou a množstvím pojiv, k danému typu zemin, spolu s přidavkem vody, lze získat samozhutnitelnou zálivku, která svými parametry umožňuje její použití v konstrukci. Ztekucení samozhutnitelných zálivek bylo v rámci výzkumných prací druhé etapy dosaženo pomocí vody. Experimentálně bylo stanoveno, že nutnost přidavku vody, byla především u samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl poměrně vysoká, což mělo vliv především na zvýšení hodnoty smrštění. Tento jev souvisel s obsahem jemnozrnných jílovitých částic, které mají tendenci na sebe vázat velké množství vody, jež v průběhu času ze zálivky a odchází a způsobuje smrštění.

Snahou a jedním z cílů výzkumných prací III etapy proto bylo najít vhodný druh přísad či příměsí, které by mohly vést k redukci vody a tím i ke zlepšení parametrů zálivek. Výběr druhů plastifikačních a ztekucujících přísad byl volen s ohledem na mineralogické složení zemin a doporučení od výrobců. Pro ověření účinku přísad na navržených recepturách samozhutnitelných zálivek byly vybrány následující druhy plastifikačních přísad: Sika ViscoCrete – 1062, Sika ViscoCrete – 21 a Sika ViscoCrete – 4088

v množství 1,0 - 3,0 % (z hmot. cementu) a ztekucujících přísad: hexametafosfát sodný, tripolyfosfát sodný a uhličitan sodný, v množství 0,04 %; 0,06 %; 0,08 %; 0,1 %; 0,5 %; 1,5 %; 2,5 %; 3,5 %; 5,0 %; 8,0 %.

V rámci prvních výzkumných prací III etapy bylo experimentálně stanoveno, že z vybraných druhů ztekucujících přísad se projevil největší synergický účinek se zeminou (písčítým jílem saCl) při použití ztekucující přísady uhličitanu sodného v množství 0,08 % (z hmot. zeminy). Na základě tohoto zjištění se u navržených samozhutnitelných zálivek dále používala již vybraná ztekucující přísada (uhličitan sodný) v daném množství (0,08 % z hmot. zeminy).

Další výzkumné práce III Etapy se týkaly ověřování účinku plastifikačních přísad (Sika ViscoCrete – 1062, Sika ViscoCrete – 21 a Sika ViscoCrete – 4088 v množství 1,0 - 3,0 % z hmot. cementu) a ztekucující přísady (uhličitanu sodného, v množství 0,08 %) na vybraných samozhutnitelných zálivkách na bázi písčitého jílu saCl, písčité zeminy fgrCSa a jílu Cl. U samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl a písčité zeminy fgrCSa, se očekávalo, že budou více reagovat s vybranými plastifikačními přísadami než se ztekucující přísadou, u které se očekávala větší synergie se samozhutnitelnými zálivkami na bázi jílu Cl. U plastifikačních přísad se zároveň předpokládalo, že budou ochotněji reagovat s cementem, a proto byly ověřovány na samozhutnitelných zálivkách s rozdílným množstvím cementu (2 % – 8 %).

Prvním ověřovaným typem byly samozhutnitelné zálivky na bázi písčitého jílu saCl. Na základě dosažených výsledků bylo zjištěno, že největší vliv na zlepšení parametrů zálivek (především rozlití, pevnosti v tlaku a smrštění) měla plastifikační přísada Sika ViscoCrete - 1062 v množství 3,0 % (z hmot. cementu) a ztekucující přísada uhličitan sodný v množství 0,08 % (z hmot. zeminy). Při použití plastifikační přísady Sika ViscoCrete - 1062 v množství 3,0 % bylo dosaženo snížení hodnoty vody až na 55 %, při zachování parametru rozlití 680 mm. Zároveň bylo zjištěno, že k mírnému zvyšování hodnoty rozlití (až na 720 mm, při 8% dávce cementu a 61 % vlhkosti) samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl docházelo se zvyšující se dávkou cementu. Tím byl prokázán synergický účinek plastifikační přísady s cementem. Vliv plastifikační přísady a cementu se projevil i na parametru pevnosti v tlaku a smrštění. U samozhutnitelné zálivky na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 % cementu a plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062 (v množství 3,0 % z hmot. cementu) bylo dosaženo pevnosti v tlaku 0,27 MPa po 28 dnech zrání a smrštění 2,1 % (při vlhkosti 23 %, po 28 dnech zrání).

Samozhutnitelná zálivka obsahující vyšší dávku cementu (4 %) dosahovala pevnosti v tlaku 0,32 MPa po 28 dnech zrání a smrštění 2,1 % (při vlhkosti 24 %, po 28 dnech zrání). Experimentálně bylo u samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna a 2 – 4 % cementu, zároveň zjištěno, že ještě většího snížení množství vlhkosti (až na hodnotu 55 %) a zvýšení parametru rozlití (až na hodnotu 700 mm) bylo dosaženo za pomoci ztekucující přísady uhličitanu sodného v množství 0,08 % (z hmot. zeminy). Synergický účinek uhličitanu sodného se projevil především s jemnozrnnými jílovitými částicemi obsaženými v písčitém jílu saCl. Při porovnání hodnot pevností v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 % a 4 % cementu, plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062 a ztekucující přísady uhličitanu sodného lze konstatovat, že vyšších pevností bylo dosaženo u zálivek obsahujících ztekucující přísadu, tedy uhličitan sodný. Nejvyšší pevnosti v tlaku 0,41 MPa, po 90 dnech zrání, bylo dosaženo u samozhutnitelné zálivky na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 4 % cementu a 0,08 % uhličitanu sodného. Při sledování účinku plastifikační a ztekucující přísady na hodnotu smrštění samozhutnitelných zálivek lze konstatovat, že menšího smrštění (na hodnotu 1,0 %, při vlhkosti 24 % po 28 dnech zrání) bylo dosaženo u zálivek obsahujících ztekucující přísadu uhličitan sodný, a to především v tom případě, kdy zálivka obsahovala 4 % cementu. Snížení hodnoty smrštění, stejně jako tomu bylo u předchozích zálivek, souviselo s nižší dávkou vody, která se k zálivkám přidávala již v čerstvém stavu. Na základě zjištěných hodnot lze konstatovat, že se uhličitan sodný v množství 0,08 % projevil účinně nejen u zlepšení parametru rozlití, pevnosti v tlaku, ale i u smrštění.

Druhým ověřovaným typem byly samozhutnitelné zálivky na bázi písčité zeminy fgrCSa. Z dosažených výsledků o účinku plastifikačních a ztekucujících přísad, které byly stanoveny u předchozího typu samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, bylo pro zlepšení parametrů zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa doporučeno použití pouze plastifikačních přísad (Sika ViscoCrete – 1062, Sika ViscoCrete – 21 a Sika ViscoCrete – 4088 v množství 1,0 - 3,0 % z hmot. cementu). Plastifikační přísady byly vybrány z toho důvodu, že vzhledem k mineralogickému složení písčité zeminy fgrCSa a použitému množství cementu (4 – 8 %) se u nich očekávala větší synergie, než se ztekucující přísadami. Z výsledků sledování závislosti rozlití na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % cementu a 0 – 3 % rozdílných druhů plastifikačních přísad bylo zjištěno, že největší vliv na rozlití (a snížení vlhkosti) měla plastifikační přísada Sika ViscoCrete – 1062 v množství 3,0 % (z hmot. cementu). Při použití této přísady v množství 3,0 % bylo dosaženo

hodnoty rozlité 690 mm a vlhkosti 27 %. U této samozhutnitelné zálivky bylo zároveň dosaženo největší pevnosti v tlaku 0,34 MPa po 28 dnech zrání. Nejmenšího smrštění 0,2 % bylo dosaženo u samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % při přidavku plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 4088 a Sika ViscoCrete – 1062 v množství 3,0 %. Na základě porovnání všech parametrů samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa lze konstatovat, že nejlepší výsledky bylo dosaženo za použití plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062 v množství 3,0 % (z hmot. cementu).

Třetím ověřovaným typem byly samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl. Na základě zjištěných výsledků o účinku plastifikačních a ztekucujících přísad, vycházejících z mineralogického složení zemin a množství použitého cementu, bylo pro zlepšení parametrů samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl navrženo použití ztekucující přísady uhličitanu sodného v množství 0,08 % a plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062 v množství 3,0 %. Vzhledem k obsahu jílovitých jemnozrnných částic ($f = 96,99$ %) v jílu Cl byla předpokládána vzájemná synergie uhličitanu sodného spolu s minerály obsaženými v jílu, stejně jako tomu bylo prokázáno u písčitého jílu saCl a vzájemná synergie plastifikační přísady spolu se zvyšující se dávkou cementu (2 – 8 %). Při sledování účinku plastifikační přísady SikaViscoCrete – 1062 na samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl bylo zjištěno, stejně jako tomu bylo u předchozích zemin, že se vliv této přísady projevoval především se zvyšujícím se množstvím přísady a zároveň s přibývajícím dávkou cementu. Nejvyššího rozlité (700 mm, při vlhkosti 63 %), při použití 3 % plastifikační přísady SikaViscoCrete – 1062, bylo dosaženo u samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl, obsahující 3,0 % vápna, 4 % cementu. Pevnost v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl byla ovlivněna jak použitím ztekucující přísady, tak dávkou cementu. Nejvyšší pevnost v tlaku 0,65 MPa (po 28 dnech zrání), při použití 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062, tak byla dosažena u samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 8 % cementu. U této zálivky bylo zároveň dosaženo nejnižšího smrštění 7,9 % (při vlhkosti 22 %, po 28 dnech zrání). Při porovnání účinku plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1060 (v množství 3,0 % z hmot. cementu) a uhličitanu sodného (v množství 0,08 % z hmot. zeminy) lze konstatovat, že větší účinek měl na hodnotu rozlité uhličitan sodný. Při použití uhličitanu sodného u samozhutnitelných zálivek na bázi Cl bylo dosaženo rozlité 690 mm (při vlhkosti 62 %, množství cementu 2 %) a 700 mm (při vlhkosti 63 %, množství cementu 4 %). Na základě dosažených výsledků lze tedy konstatovat, že pro ztekucení samozhutnitelných zálivek se projevilo jako účinnější

použití ztekucující přísady uhličitanu sodného v množství 0,08 %, než plastifikační přísada SikaViscoCrete – 1062 (v množství 3,0 % z hmot. cementu). Zároveň vyšších hodnot pevnosti v tlaku 0,39 MPa (po 28 dnech zrání) a nižšího smrštění 5,5 % (po 28 dnech zrání) bylo dosaženo u samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl s použitím uhličitanu sodného v množství 0,08 % a s vyšší dávkou cementu (4 %). Na základě zjištěných výsledků lze konstatovat, že pro zlepšení parametrů zálivky (rozlití, pevnosti v tlaku a smrštění) na bázi jílu Cl se jako účinnější jevílo použití ztekucující přísady uhličitanu sodného než plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062.

Předmětem výzkumných prací III Etapy zároveň bylo, navrhnou a ověřit ztekucení zemin, umožňující jejich zpětné použití ve stabilizované a samozhutnitelné formě, s použitím alternativních surovin (fluidního popílku). U samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl se nejprve hodnotily reologické vlastnosti, na základě kterých byly zjištěny následující poznatky. Přídavek fluidního popílku v množství do 30 % (z hmot. zeminy) výrazně zvyšoval hodnotu rozlití směsi až na 790 mm (SF3). Vyšší množství popílku (60 %) naopak hodnotu rozlití snižovalo. Tento jev byl ovlivněn přítomností CaO v popílku, který okamžitě reagoval s přidanou vodou. Obecně lze konstatovat, že přídavkem popílku, především pak do hodnoty 30 %, k samozhutnitelné zálivce došlo ke zlepšení reologických vlastností a stabilizaci zálivky. U zálivek, ve kterých byl přítomný popílek, byla zároveň snížena dekantace (odstoj vody). Z těchto výsledků lze usuzovat, že popílek v zálivce působil jako účinný stabilizátor. Při srovnání hodnoty rozlití zálivky, kde nebyl a kde byl přítomný cement, lze konstatovat, že na hodnotu rozlití měl spíše vliv popílek než cement. Na základě dosažených parametrů rozlití lze konstatovat, že se jako optimální jevílo použití fluidního popílku do 30 %. Z ekonomického hlediska, lze také konstatovat, že částečná náhrada zeminy popílkem vede ke snížení celkových nákladů při návrhu směsi. Při hodnocení pevnosti v tlaku můžeme říci, že s přibývajícím množstvím fluidního popílku v zálivce, docházelo ke zvyšování pevnosti v tlaku, ovšem pouze do hodnoty 10 %. Vyšší dávka fluidního popílku (30 % a 60 %) hodnoty pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl snižovala. Při přídavku 5 % fluidního popílku k jílu saCl bylo dosaženo pevnosti v tlaku 0,25 MPa (po 7 dnech zrání). Přidáním 10 % fluidního popílku k písčitému jílu saCl se pevnost v tlaku po 7 dnech zrání zvýšila na 0,3 MPa. Přídavek 30 % fluidního popílku k písčitému jílu saCl vedl ke snížení hodnoty pevnosti v tlaku na 0,11 MPa. S dalším přídavkem popílku, na hodnotu 60 % (z hmot. zeminy), byla pevnost v tlaku po 7 dnech zrání 0,2 MPa. Přítomnost CaO ve fluidním

popílku mohla hodnoty pevnosti v tlaku směsí mírně zvyšovat, ovšem tento jev nebyl až tak znatelný. Výrazný vliv na zvýšení hodnoty pevnosti v tlaku měl především cement. Cement spolu se zeminou reagoval velice ochotně za vzniku hydratačních produktů (rozpustných gelů), které postupem času krystalovaly a vytvářely propletenou mřížku, což se projevilo i na výsledných pevnostech vzorků. Na základě dosažených hodnot rozlití a pevnosti v tlaku, a s ohledem na ekologické parametry lze konstatovat, že se jako optimální jevilo při návrhu samozhutnitelných zálivek na bázi saCl a 4 % cementu použití fluidního popílku do 10 %.

V rámci výzkumných prací III Etapy disertační práce bylo zároveň provedeno ověření účinku plastifikačních a ztekucujících přísad a příměsí (fluidního popílku) na stanovení dob tuhnutí vybraných samozhutnitelných zálivek. Experimentálně bylo stanoveno, že plastifikační a ztekucující přísady, stejně jako přídavek fluidního popílku, měly pozitivní vliv na zlepšení dob tuhnutí. Díky přísadám (plastifikačním a ztekucujícím) a fluidního popílku (FA) se doby tuhnutí zkrátily až o 3 hodiny. Nejkratší doba počátku (6,25 hod – 5 % FA, 4,75 hod – 10 % FA) a konce (28,25 hod – 5 % FA, 20,50 hod – 10 % FA) tuhnutí byla naměřena u samozhutnitelných zálivek na bázi saCl, 4 % cementu a 5 – 10 % popílku. Nejdelší doba počátku (19,50 hod) a konce (53,50 hod) tuhnutí byla naměřena u samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 2,0 % cementu a 0,08 % uhličitanu sodného.

V souvislosti s výsledky parametrů rozlití, pevností v tlaku, smrštění a dob tuhnutí samozhutnitelných zálivek na bázi zemin, bylo jednoznačně prokázáno, že použitím plastifikačních a ztekucujících přísad a příměsí (fluidního popílku), při návrhu samozhutnitelných zálivek na bázi zemin, došlo ke zlepšení všech výše uvedených parametrů, a proto se doporučuje jejich použití ve výše uvedeném množství a ve vzájemné synergii s daným typem zeminy. S ohledem na použité druhy materiálů a způsob úpravy zemin lze konstatovat, že byla vyvinuta zcela nová technologie úpravy zemin, kterou lze v nynější praxi považovat za unikátní.

4.4 Etapa IV - Samozhutnitelné zálivky vs. stávající technologie, ověření vyvinuté technologie in situ

IV Etapa disertační práce byla zaměřena na porovnání nově vyvinuté technologie zpětného využití zemin ve formě samozhutnitelných zálivek se stávajícími technologiemi provádění výkopů inženýrských sítí. Porovnání technologií bylo provedeno s ohledem především na aplikovatelnost samozhutnitelné zálivky, její použitelnost, ekonomické, bezpečnostní a environmentální hledisko.

4.4.1 Samozhutnitelné zálivky vs. stávající technologie

V běžné praxi se pro provádění výkopů inženýrských sítí nejčastěji používá technologie zhutňování (zemin, písku, šterkopísku atp.). Tato technologie byla proto vybrána pro srovnání s nově vyvinutou technologií samozhutnitelných zálivek na bázi zemin.

Zhutňováním zemin dochází k vytváření stability zemních konstrukcí tak, aby se jednotlivé konstrukční vrstvy nedeformovaly (nesedaly) vlivem zatížení, nebo aby nedocházelo k jejich sedání. Technologicky lze tento proces popsat tak, že se jedná o „umělé“ zvyšování objemové hmotnosti zeminy působením statického nebo dynamického zatížení, jejímž cílem je dosáhnout v zemině takových změn, aby nedocházelo k jejímu sedání, zvýšila se těsnost a nepropustnost zhutňovaných vrstev a zlepšily se mechanické vlastnosti zeminy. Zhutňování zemin může být provedeno několika způsoby např. válcováním, ubíjením (vibrační pěchy, desky), dynamickou konsolidací, hloubkovou vibrací, hydromechanickým zhutňováním apod. Výběr vhodné metody pro dosažení optimálního zhutnění zemin (cca 0,2 – 0,5 MPa) závisí hned na několika parametrech. Mezi nejdůležitější patří především velikost prostoru, druh použitého materiálu inženýrských sítí, možnost působení dynamického účinku (těsná blízkost objektů), doba vyhrazena pro zhutňování, soudržnost a vlhkost zhutňovaného materiálu (soudržné, nesoudržné) apod. S ohledem na výkopy inženýrských sítí a využíváním běžně dostupných materiálů pro jejich zhotovení lze konstatovat, že nejběžněji využívanou metodou je tzv. ubíjení pomocí pěchů či vibračních desek (viz Obr. 117 a Obr. 118). Při této technologii se využívá dynamického účinku, který má za následek zhutňování jednotlivých vrstev materiálů tvořící výkop. I přes to, že se jedná o nejběžněji využívanou metodu i její účinek na zhutnění, stejně jako u jiných metod, závisí především na materiálu, který má být touto metodou zhutněn. Pro výkopové práce inženýrských sítí je ideální zpětně využívat materiály (zeminy), které vznikají v rámci výkopových prací.

Možnost použití jednotlivých druhů materiálů, pro vyplnění prostor výkopu, je ovšem řízeno, jak bylo uvedeno v kapitole 1.1.5, přísnými požadavky, které tyto materiály musí splňovat.



Obr. 117. Ubíjení pomocí vibrační desky



Obr. 118. Zhutňování materiálu
vibrační deskou

V běžné praxi se ovšem dostáváme do situace, kdy většina zemin bohužel nesplňuje požadavky pro jejich zpětné použití v konstrukci a je nutné je odvážet na skládky odpadů (viz 1.1.3, Obr. 119 a Obr. 120). Místo nevhodných zemin jsou pak pro výkopy inženýrských sítí na stavbu dováženy optimální druhy materiálů, které lze zhutnit a vyplnit jimi prostory výkopů inženýrských sítí (Obr. 121). Z ekonomického i ekologického hlediska se tento proces nakládání se zeminou nejeví jako optimální. Z tohoto důvodu bylo snahou této disertační práce vyvinout optimální technologii či způsob, který by vedl k dosažení zlepšení požadovaných parametrů zemin tak, aby bylo možné jejich zpětné využití v konstrukci. Z dosažených výsledků předchozích výzkumných prací jednotlivých etap, bylo zjištěno, že za pomoci vhodné volby pojiv, ztekucujících či plastifikačních přísad a vedlejších energetických produktů, lze dosáhnout úpravy zemin zcela novým způsobem, který lze v nynější praxi považovat za unikátní. Obecně lze tento proces úpravy nazvat jako „technologie samozhutnitelných zálivek“ či „technologie ztekucení zemin“.



Obr. 119. Odvážení nevhodné zeminy



Obr. 120. Skládkování zemin



Obr. 121. Nevhodné zeminy pro zhutňování (vlevo od výkopu), vhodné materiály pro zhutňování (vpravo od výkopu)

V nynější praxi jsou známy technologie samozhutnitelných zálivek, které jsou tzv. „členem rodiny“ cementových malt a mohou být označovány několika výrazy, např. „CLSM“, „CDF – controlled density fill“, „flowable fill“, „soil-cement slurry“, „unshrinkable fill“, „K-Krete“ atd. Nutné je zde ovšem podotknout, že se jedná o materiály na bázi jemného kameniva, vedlejších energetických produktů apod., ovšem ne na bázi zemin. Ztekucení zemin tedy spadá do nového druhu technologie, který není v nynější praxi znám. V České Republice se jedná o dosud zcela nepoužívanou technologii. V zahraničí je tato technologie popsána a realizována pouze výjimečně. Zmínky o zkušenostech s využíváním ztekucených zemin lze najít např. v Německu, Švýcarsku, Francii, Itálii, Velké Británii,

USA a Japonsku. Principy ztekucení zemin jsou v zahraničí založeny na použití materiálů, kterými jsou např. stabilizátory (především pojiva), ztekucovadla a případně alternativní suroviny. Konkrétní typy přísad, vzhledem k omezenému používání této technologie a tzv. „know how“, nejsou ovšem v praxi běžně známy. Z tohoto pohledu jsou tedy výsledky výzkumných prací této disertace vedoucí k nově vyvinuté technologii samozhutnitelných zálivek na bázi zemin zcela unikátní. A to i z pohledu procesu vyplnění prostor výkopů inženýrských sítí, který lze provádět zcela novým způsobem, ve srovnání s technologií zhutňování (Obr. 122 a Obr. 123).



Obr. 122. Technologie zhutňování zemin



Obr. 123. Technologie samozhutnitelných zálivek

Při provádění technologie samozhutnitelných zálivek na bázi zemin je nutné, stejně jako při provádění technologie zhutňování materiálů výkopů IS, či jakýchkoliv jiných stavebních prací, dodržet jednotlivé pracovní postupy, a to jak z hlediska případné úpravy zemin, tak aplikovatelnosti již hotové samozhutnitelné zálivky. V následujícím textu jsou uvedeny jednotlivé postupy přípravy, aplikovatelnosti a doporučení pro provádění samozhutnitelné zálivky v praxi.

4.4.1.1. Příprava a aplikace samozhutnitelných zálivek

Primární surovinou pro výrobu samozhutnitelných zálivek jsou zeminy získané z výkopových prací IS. Tyto zeminy jsou na staveništi vyhloubeny pomocí bagrů a ukládány na nejbližší možné místo vedle výkopů. Pokud není zemina ihned po vykopání zpracována, doporučuje se ji zakrýt neprodyšným materiálem, aby nedocházelo k její kontaminaci či navlhnutí v případě působení deště. Při zakrytí je zemina zároveň částečně chráněna před působením mrazu. V případě obsahu nežádoucích složek v zemině (hrubozrnné částice

větší jak 32 mm, organické příměsi – kořeny rostlin, stromů atd.), které by znesnadňovaly její zpětné použití v samozhutnitelné formě, je nutná její předúprava.

Hrubozrnné frakce (nad 32 mm) a větší organické částice mohou být ze zeminy odstraněny pomocí prosévací rotační lžíce Flexxifinger® quicker picker na smykem řízené nakladače (Obr. 124). Výhodou těchto strojů je, že mají nastavitelné rotační lžíce s menšími či většími oky. Zeminu tak lze upravit na požadovanou frakci. Prosévání zařízení Flexxifinger® quicker picker funguje na principu odstředivé síly, čímž dochází k oddělování menších frakcí, než jsou otvory nástavce. Požadovaná frakce zeminy tedy zůstává pod lžicí a nežádoucí frakce v ní. Tímto procesem lze snadně a rychle upravit zeminu na námi požadované parametry. V případě, že je zemina po vykopání příliš zvlhlá a není možná úprava její frakce, doporučuje se ji nechat delší dobu odležet. Většinou ovšem mají zeminy po vyhloubení vlhkost cca do 20 %, což by nemělo mít na prosévání vliv. Kromě rotační lžíce mohou být pro úpravu zeminy dále použity např. prosévací lžíce bez nebo se zuby (Obr. 125), mobilní třídiče či drtiče, půdní frézy apod. Výběr konkrétního druhu prosévacího zařízení závisí vždy na prostoru a možnostech jejího použití na staveništi.



Obr. 124. Rotační lžíce
Flexxifinger® quicker picker [35]



Obr. 125. Prosévací lžíce [36]

V případě, že obsahuje zemina shluky vytvářející tzv. pevné celky, které jsou utvářeny zvlhlými jílovitými částicemi, je vhodné pro jejich rozpojení použití mechanizace. K rozpojování zeminy mohou sloužit půdní drtiče, jak již bylo zmíněno výše, či ruční nástroje (kladiva, rýče, hrábě, ruční drtiče a třídiče atd.).

Pomocí výše uvedených přístrojů a nástrojů lze tedy ze zeminy, pokud je to nutné, odstranit nežádoucí složky a získat tak materiál pro další zpracování. Jak bylo pojednáno v kapitole 1.2, pro dosažení samozhutnitelné zálivky optimálních parametrů je nutné k zeminám přidat další složky, kterými jsou pojiva, přísady, příměsi a voda. V případě, že by byla samozhutnitelná zálivka zpracována přímo na staveništi jsou jednotlivé složky (pojiva, přísady, příměsi) dováženy z nejbližších dostupných míst. Pojiva (vápno, cement) a příměsi (vedlejší energetické produkty - fluidní popílek) jsou většinou dováženy v pytlované formě a na staveništi musí být chráněny před vlhkostí a přímým sluncem. Proto se doporučuje jejich skladování v neprodyšných pytlích, nejlépe pod zastřešením. Příměsi (plastifikační, ztekucující) jsou vždy dováženy v původním, neporušeném obalu a na staveništi je nezbytné, stejně jako tomu bylo u předešlých surovin, je skladovat na suchém a zastřešeném místě. Vodu je možné odebírat z vodovodního řádu, případně, pokud tomu tak není možné, ji dovážet v barelech.

Dalším technologickým krokem je míchání jednotlivých složek (zeminy, pojiv, přísad, příměsí a vody). Pokud obsahuje zemina vyšší vlhkost (nad 25 %) doporučuje se ji 24 hod, před mícháním s ostatními složkami a vodou, tzv. ošetřit nevyhašeným vápnem (Obr. 126). Promícháním zeminy s vápnem (např. ručně hráběmi či pomocí míchačky) dojde ke snížení vlhkosti a zlepšení zpracovatelnosti. Tento krok není nezbytně nutné provádět a zeminu je možné rovnou míchat s dalšími surovinami podle následujících kroků. Nejprve je vhodné míchat zeminu spolu s cementem a vápnem (pokud nebylo přidáno v rámci předešlého kroku) pomocí např. běžné stavební míchačky s nuceným oběhem (Obr. 127). Tyto míchačky je možné použít přímo na staveništi. Zeminu s pojivy je vhodné míchat po dobu cca 5 – 10 min. Pro dávkování jednotlivých složek (zeminy, cementu a vápna) je možné využívat vah, které bývají součástí míchaček (viz Obr. 128), případně externích vah, které musí být na staveniště dovezeny. Po smíchání zeminy s pojivy se ke směsi přidávají plastifikační či ztekucující přísady, jež jsou předem rozmíchány v malém množství vody. Díky tomu, že jsou přísady (plastifikační, ztekucující) obsaženy v samozhutnitelné zálivce v malém množství je nutné jejich přesné odvážení pomocí vah. Jako poslední se do směsi přidává voda. Dávkování vody záleží na vlhkosti zeminy a požadované hodnotě rozlití. Voda se tedy dávkuje na požadovanou konzistenci zeminy, která se prověřuje pomocí zkoušky rozlití (Obr. 129). Po aplikaci vody k zemině, pojivům, přísadám (příměsím) je vhodné smes míchat po dobu minimálně 5 – 10 minut tak, aby byly jednotlivé složky důkladně promíchány. Po získání samozhutnitelné zálivky optimální konzistence je možné ji aplikovat

do připraveného výkopu. Vyprazdňování míchačky je možné buď spodním vyprázdňováním či překlopením do připraveného převozního zařízení (nejlépe koleček). Po převezení k výkopu se samozhutnitelná zálivka aplikuje v rovnoměrných vrstvách bez nutnosti hutnění či vibrace.



Obr. 126. Ošetření zeminy vápnem



Obr. 127. Míchačka s nuceným oběhem



Obr. 128. Dávkování složek do míchačky



Obr. 129. Ověřování konzistence

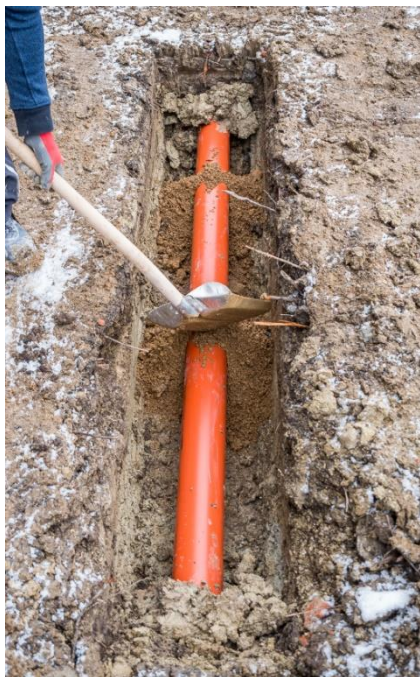
Pokud nám místo stavby neumožňuje míchání směsí přímo na staveništi, lze použít autodomíchávače. Tyto stroje jsou schopny převážet směsi i na větší vzdálenosti. Vnitřní prostor bubnu autodomíchávače je vybaven šroubovicí, která při převozu udržuje směs stále v pohybu. Pro naložení zeminy a ostatních složek do autodomíchávače lze využít např. bagry či traktory se lžicemi. Vhodné je také použití pásových dopravníků (mobilních či stabilních). Vykládka směsí z autodomíchávačů může být prováděna

bud' spodním vyprazdňováním, kdy je směs lita přímo na určené místo, či pomocí čerpadel (čerpaní směsí do vzdálenějších míst).

Po vyplnění prostoru výkopu inženýrských sítí samozhutnitelnou zálivkou se musí staveniště zabezpečit tak, aby tam nebyl umožněn přístup cizích osob a aby byly zajištěny vhodné hydratační podmínky pro samozhutnitelnou zálivku. V tomto případě se zabezpečuje staveniště kovovým ohrazením (např. oplocením) a výkop se překryje neprodyšným materiálem.

Nutno je zde podotknout, že samozhutnitelné zálivky nelze použít ve všech teplotních a klimatických podmínkách. Doporučuje se, aby nejnižší teplota při aplikaci byla $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ a zálivka se neaplikovala do namrzlého výkopu. Zároveň není vhodné samozhutnitelné zálivky aplikovat při teplotách vyšších jak $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Optimální teplota aplikace samozhutnitelných zálivek se tak pohybuje v rozmezí $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$. V případě, že by teplota při aplikaci klesla po $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ či překročila $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$, je potřeba provést zvláštní opatření. Jednalo by se např. o přidání urychlovačů či zpomalovačů tuhnutí, použití vody vyšších teplot (cca $50\text{ }^{\circ}\text{C}$) apod.. Samozhutnitelné zálivky se zároveň nedoporučuje provádět během silného či dlouhotrvajícího deště. Po aplikaci by měla být samozhutnitelná zálivka, jak již bylo zmíněno výše, chráněna před deštěm a případným mrazem.

Přípravné práce, pře samotnou aplikaci samozhutnitelné zálivky, souvisí také se zajištěním inženýrských sítí (trub – vodovodních, kanalizačních, atd.), aby nedošlo k jeho vyplavení. Trouby se proto po celé délce koruny a ve spodní části pevně uchycují k podkladu pomocí tzv. ocelových zámků. Možné je rovněž použití lokálních zásypů/obsypů (Obr. 130), či tzv. stabilizací shora (dřevěnou rozpěrrou, viz Obr. 131), která se osazuje na horní hranu trub, mezi dvě strany výkopu. V některých případech se pro zajištění trub vkládají podpory i do jejich vnitřních částí. Tento způsob úpravy se provádí především z toho důvodu, aby nedocházelo k deformaci trub. V případě, že je na staveništi provedena pečlivá příprava postupu montáže trub je možné tyto „systémové požadavky“ vynechat.



Obr. 130. Stabilizace trub zásypem



Obr. 131. Stabilizace trub shora [42]

4.4.1.2. Výhody použití samozhutnitelných zálivek

Technologie zpětného využití zemin ve formě samozhutnitelných zálivek má, ve srovnání s technologií zhutňování zemin, řadu výhod. Hlavními výhodami samozhutnitelných zálivek na bázi zemin jsou:

- **Využitelnost zemin a eliminace jejich skládkování.** Ve srovnání s technologií zhutňování nedochází při provádění samozhutnitelných zálivek ke vzniku odpadu a nutnosti skládkování zemin. Zároveň lze, za pomoci vhodné úpravy, využít téměř všech typů zemin. Samozhutnitelnou zálivku je možné aplikovat do výkopu ihned po jejím zhotovení.
- **Úprava receptury samozhutnitelných zálivek.** Velkou výhodou samozhutnitelných zálivek na bázi zemin je všestrannost jejího návrhu pro dosažení požadovaných parametrů. Pomocí vhodného druhu a množství pojiv, přísad či příměsí lze upravit např. tekutost směsi, pevnost v tlaku, urychlit či zpomalit počátek a konec tuhnutí, snížit objemovou hmotnost, smrštění atd.
- **Využitelnost alternativních typů surovin.** Při návrhu samozhutnitelných zálivek je možné použít alternativních typů surovin (popílků), pomocí kterých lze zlepšit reologické vlastnosti, zvýšit pevnost v tlaku, počátek a konec tuhnutí atd. Při využití popílku se zároveň eliminuje nutnost jejich skládkování a zvyšuje se tím

potenciál jejich použití v rámci dalšího druhu technologie. Množství popílků v samozhutnitelné zálivce musí být ovšem vždy v souladu s ekologickými parametry.

- ***Pevnost v tlaku a odolnost.*** Jak již bylo zmíněno výše pevnost v tlaku samozhutnitelných zálivek lze upravit na požadované parametry. Důležité ovšem je, že pomocí samozhutnitelných zálivek lze dosáhnout vyšších pevností v tlaku než v případě technologie zhutňování zemin, které není ani v některých případech vůbec možné. Samozhutnitelné zálivky jsou zároveň, ve srovnání s technologií zhutňování, méně propustné a tím více odolné vůči erozi.
- ***Ztekucení.*** Ve srovnání s technologií zhutňování zemin, má samozhutnitelná zálivka velkou výhodu ve schopnosti jejího tečení bez nutnosti použití dalších stavebních strojů a zařízení.
- ***Eliminace sedání a odvodnění.*** Samozhutnitelné zálivky po jejich aplikaci, ve srovnání s technologií zhutňování, nevyžadují žádnou údržbu, jako např. dohutnění, doplnění atp. Při aplikaci samozhutnitelné zálivky nevznikají žádné prázdné prostory, čímž je eliminováno sedání. Samozhutnitelné zálivky zároveň dokážou vytlačit jakoukoliv stojící vodu ve výkopu a eliminovat tím odvodnění.
- ***Rozměrové omezení výkopů.*** Technologie aplikace samozhutnitelných zálivek umožňuje její použití i v užších výkopech, kde by nebylo možné použít zhutňovacích strojů. Zároveň je možné aplikovat samozhutnitelné zálivky i ve velkorozměrových výkopech za dalších výhod (rychlejší aplikace, snížení množství zařízení, zvýšení bezpečnosti pracovníků atd.).
- ***Snadné dodání a aplikace.*** V případě, že nejsou samozhutnitelné zálivky zhotoveny přímo na staveništi, je možné je dovážet pomocí autodomíchávačů. Umístění pomocí autodomíchávačů je rychlé a zpravidla vyžaduje pouze jednu osobu, aby nasměrovala žlab.
- ***Rychlost aplikace bez nutnosti hutnění.*** Samozhutnitelné zálivky lze provádět pomocí rychlého vypouštění ze skluzu/žlabu, čerpadel nebo koleček bez nutnosti hutnění či vibrace, čímž se eliminuje čas nutný pro uzavření silnice, chodníku atd.
- ***Jednodušší aplikovatelnost i v méně přístupných místech.*** Pomocí žlabů, čerpacích zařízení či koleček lze, ve srovnání s technologií zhutňování, aplikovat

samozhutnitelné zálivky i do těch nejméně přístupných a vzdálených míst a zároveň zajistit, že bude vyplněn veškerý prostor okolo IS.

- **Redukce množství zařízení.** Ve srovnání s technologií zhutňování zeminy lze samozhutnitelné zálivky umístit do výkopů bez nutnosti použití nakladačů, zhutňovacích zařízení a bez nutnosti přítomnosti stavebního dozoru.
- **Zvýšení bezpečnosti pracovníků.** Při provádění samozhutnitelných zálivek nemusí pracovníci vstupovat do výkopů, aby je zaplnili, čímž se snižuje nutnost pohybu pracovníků v zúžených prostorech. Zároveň nejsou pracovníci při aplikaci samozhutnitelné zálivky vystaveni působení dynamických rázů od zhutňovacích zařízení.
- **Menší riziko poškození IS.** Na rozdíl od provádění technologie zhutňování, je při aplikaci samozhutnitelné zálivky menší riziko porušení inženýrských sítí. A to především z toho důvodu, že při vyplňování výkopů samozhutnitelnou zálivkou nevznikají dynamické rázy, které by mohly trouby poškodit.
- **Snadná vyhloubitelnost.** Velkou výhodou samozhutnitelných zálivek je to, že jsou navrhovány na takové pevnosti v tlaku, aby bylo možné je v budoucnu vyhloubit (v případě poškození či výměny trub) a to i za pomoci běžných nástrojů pro kopání zeminy či bagrů.
- **Testování samozhutnitelných zálivek.** Testování samozhutnitelných zálivek (rozliti, pevnost v tlaku) a to přímo na staveništi, je snazší než testování spojené s určením pevnosti zhutněné zeminy.

I přes výše uvedenou řadu výhod použití samozhutnitelných zálivek pro vyplnění prostor IS může mít v praxi tato technologie i nevýhody. Mezi některé z nich patří například to, že:

- technologie samozhutnitelných zálivek může být díky použití potřebných surovin více nákladná, než zásypy (písek, šterkopísek atd.),
- nesprávné navržení samozhutnitelných zálivek (příliš vysoká pevnost) může způsobit nesnadné vyhloubení v budoucnu,
- pro veškeré používané suroviny nelze na staveništi zajistit jejich dostatečné skladování,
- mohou vznikat prodlevy při umístění a dodávce samozhutnitelných zálivek pomocí autodomíchávačů,

- pracovníci nejsou dostatečně informováni o správném návrhu a použití surovin pro samozhutnitelné zálivky (nesprávné dávkování, manipulace atd.).

Všechny výše uvedené nevýhody by nemusely nastat v případě, že budou pracovníci dostatečně informováni o provádění a aplikaci samozhutnitelných zálivek a bude řádně provedeno plánování jednotlivých prací. Pro eliminaci nevýhod je tedy nutná přítomnost stavebního dozoru.

4.4.1.3. Ekonomické a environmentální zhodnocení samozhutnitelných zálivek

Z ekonomického a environmentálního hlediska lze konstatovat, že veškeré výzkumné práce této disertace byly prováděny s ohledem jak na ekonomické, tak na environmentální parametry. Především pak samotné zpětné využití zemin a nakládání s nimi.

Podněty a problémy ze strany občanů, firem atd., týkajících se nakládání s výkopovou zeminou, v posledních letech narůstají. Problémy se týkají zejména: značně zvýšené prašnosti, intenzivním provozem nákladních vozidel, možnou kontaminací lokality případně znečištěnou zeminou, změny odtokových poměrů, změny krajinného rázu apod. a v neposlední řadě samotným odvážením zeminy na skládku či na jiné shromažďovací nebo skladovací místa (deponie, mezideponie), protože nesplňuje požadavky pro její zpětné použití v konstrukci. Odvozem zeminy z místa, kde byla vykopána, na skládku, zároveň vznikají náklady na dopravu a skládkování.

Problematika, týkající se nakládání s odpady, je obecně celosvětově diskutovaným tématem. Na základě ochrany životního prostředí vznikla v rámci EU tzv. nová strategie pro předcházení vzniku odpadů a jejich recyklaci. Tato dlouhodobá strategie má přispět k tomu, aby se Evropa stala „recyklační společností“. V rámci strategie vzniká řada opatření a požadavků, které mají předcházet vzniku odpadů a využívat odpady jako zdroj. Z těchto opatření pro ČR plyne např. požadavek, kdy v roce 2024 má platit zákaz skládkování recyklovatelných odpadů. Podstatou disertace tak byla práce v souladu s Plánem odpadového hospodářství ČR (nyní s POH ČR pro období 2015 - 2024) se snahou minimalizovat množství odpadů s potenciálem jejich dalšího využití.

Na základě těchto opatření bylo proto značnou motivací výzkumných prací disertace najít vhodnou technologii úpravy zemin, která by měla své potencionální využití ve stavební praxi a zároveň by vedla k: eliminaci množství zemin z výkopových prací, které končí na skládkách, snížení ekonomického hlediska při nakládání se zeminou a skládkováním zemin, snížení

problémů narůstajících při práci se zeminou (hluk, prašnost atd.) a rozšíření možností úprav zemin zcela novým způsobem.

Z dosažených výsledků výzkumných prací této disertace lze konstatovat, že za pomoci vhodných druhů přísad (plastifikačních, ztekucujících) a příměsí (fluidního popílku) bylo docíleno úpravy zemin tak, aby bylo možné jejich zpětné využití v konstrukci ve formě samozhutnitelných zálivek. Z tohoto pohledu můžeme říci, že zpětné využití téměř všech typů zemin z výkopových prací má pozitivní vliv jak na ekonomické, tak na environmentální parametry.

Při návrhu samozhutnitelných zálivek na bázi zemin, jak bylo experimentálně doloženo v rámci výzkumných prací této disertace, lze zároveň použít vedlejší energetické produkty (popílky) a to až do množství cca 30 % (vždy s ohledem na ekologická kritéria) z hmotnosti zeminy. Použití vedlejších energetických produktů v rámci technologie samozhutnitelných zálivek na bázi zemin má tedy také pozitivní vliv na ekonomické a ekologické parametry.

Obecně lze konstatovat, že při návrhu samozhutnitelných zálivek na bázi zemin nebyly použity žádné druhy surovin, které by mohly výkop či inženýrské sítě kontaminovat. Z tohoto pohledu se samozhutnitelné zálivky na bázi zemin jeví jako ekologický produkt.

Při hodnocení ekonomického kritéria můžeme říci, že technologie samozhutnitelných zálivek může být díky použití potřebných surovin (především plastifikačních a ztekucujících přísad, viz Tab. 26) více nakládána, než zhutňované zásypy (písek, štěrkopísek atd.). I přes možnou vyšší cenu je ovšem důležité hodnotit všechny parametry technologií (aplikace, použité materiály, stavební stroje, množství pracovníků, bezpečnost práce atd.), na základě kterých se prokázalo, že technologie samozhutnitelných zálivek na bázi zemin může díky svým výhodám jednoznačně konkurovat technologii zhutňování.

Tab. 26: Ceny použitých surovin samozhutnitelných zálivek

Surovina	Orientační cena [Kč/t]
Zemina	^a
Nehašené vápno	5 150
Cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	3 100
Sika ViscoCrete - 1062	39 000
Uhličitan sodný	55 000
Fluidní popílek	40 - 90
Voda	50 – 115
^a Cena není uvedena, protože se předpokládá její využitelnost přímo z místa staveniště	

4.4.2 Ověření vyvinuté technologie in situ

V rámci výzkumných prací IV Etapy disertační práce, bylo zároveň provedeno ověření nově vyvinuté technologie v reálných podmínkách. Proces výzkumných prací probíhal na staveništi v lokalitě Brno, ul. Provazníkova. Směs byla vyzkoušena na výkopu o rozměrech 1,5 m x 0,4 m x 0,5 m, ve kterém vedlo vodovodní potrubí z polymerní roury o průměru 125 mm (Obr. 132).

Pro ověření byla použita směs složená z písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 4 % cementu a 0,08 % ztekucující přísady (uhličitanu sodného). U směsi bylo sledováno dokonalé obtečení instalací, samozhutnění, stabilita a únosnost v čase.

V rámci experimentu byla použita zemina, která byla vykopána přímo na staveništi. Použitá pojiva (nehašené vápno, CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R) byly na staveniště dovezeny v pytlované formě a skladovány v suchém prostředí. Dávkování pojiv probíhalo ručně. Ztekucující přísada byla skladována v plastové nádobě. Před dávkováním ztekucující přísady bylo provedeno její důkladné protřepání. Dávkování ztekucující přísady probíhalo ručně. Všechny složky byly před mícháním odvažovány pomocí laboratorních vah.

Vzhledem k vyššímu obsahu vlhkosti zeminy (22 %), přítomnosti jílovitých složek a také s ohledem na nižší teploty prostředí (cca 2° C), bylo nejprve přistoupeno k promísení zeminy s 3,0% dávkou vápna 24 hodin předem. Tento krok byl zvolen především pro snížení množství záměsové vody, která ovlivňuje tuhnutí směsi. Míchání zeminy s vápnem bylo prováděno ručně (Obr. 133). Následné míchání bylo provedeno pomocí míchačky s nuceným oběhem, určené pro zeminy. Míchačka je svým horním povrchem osazena sítím (Obr. 134) pro separaci zrn větších jak 16 mm. Odstranění větších zrn bylo nutné z toho důvodu, že by mohly znesnadnit zatékání směsi do nejmenších prostor v okolí instalace.



Obr. 132. Výkop
s vloženou instalací



Obr. 133. Ruční míchání zeminy s vápnem



Obr. 134. Míchačka na zeminy opatřena na horní straně sítím

Po 24 hodinách, od mísení zeminy s vápnem, následovalo míchání zeminy s ostatními složkami. Nejprve se jednalo o 5 minut mísení vápnem ošetřené zeminy s cementem. Následně byla do směsi přidána ztekucující přísada, která byla předem rozmíchána spolu s malým množstvím vody. Za intenzivního míchání, které probíhalo cca 5 min, byla do směsi postupně přidávána voda. Množství vody přidané do směsi se řídilo hodnotou optimálního rozlití, které se ověřovalo pomocí zkoušky rozlití Abrams kuželem (Obr. 135 a Obr. 136), kdy bylo naměřeno v průměru rozlití 700 mm. Po namíchání byla směs odlita do výkopu. Převážba a odlévání směsi bylo prováděno pomocí koleček (Obr. 137). Pro laboratorní ověření byly ze směsi odebrány vzorky, na kterých se po sedmi dnech uložení v laboratorních podmínkách stanovovala pevnost v tlaku (Obr. 138). Ta dosahovala hodnoty 0,3 MPa.

V reálných podmínkách bylo pozorováno, že se v čase stávala směs únosnější a po sedmi dnech zrání i částečně pochozí.



Obr. 135. Stanovení hodnoty rozlití směsi



Obr. 136. Stanovení hodnoty rozlití směsi



Obr. 137. Odlévání směsi



Obr. 138. Odběr vzorků směsi

Z hlediska posouzení dosažených vlastností lze konstatovat, že směs měla tendenci snadno vodovodní instalaci obtékat a vykazovala samozhutňující účinek (Obr. 139). Směs tedy bylo možné snadno odlévat bez nutnosti vibrace. V důsledku přítomnosti pojiv (vápna a cementu) vykazovala směs svou stabilitu. Tento jev byl pozorován tím, že nedocházelo k sedimentaci částic a až do vytvrdnutí si směs zachovala rovnoměrné rozptýlení částic. Účinek pojiv se projevil i zvyšováním únosnosti směsi v čase (Obr. 140). Vzhledem k nízkým teplotám (cca 2° C) však bylo tuhnutí směsi poměrně pomalé a v reálných podmínkách stavby by komplikovalo navazující stavební činnosti.



Obr. 139. Snadné obtékání směsi



Obr. 140. Zrání směsi v čase

5 ZÁVĚR

Cílem dizertační práce byl vývoj nové unikátní technologie zpětného využití zemin ve formě samozhutnitelných zálivek. Bylo nutné formulovat pro stavební praxi optimální technologii či způsob, který by vedl k dosažení zlepšení požadovaných parametrů zemin tak, aby bylo možné jejich zpětné využití. K tomuto cíli bylo využito moderních vědeckých metod, které následně mohly podat přehled o chování a mikrostruktuře vyvinutých hmot.

Zeminy vznikající v rámci výkopových prací inženýrských sítí zaujímají značnou produkci (cca 65 % ze všech druhů odpadů), a proto, že nesplňují požadavky pro jejich zpětné použití v konstrukci, končí ve většině případů na skládkách odpadů. Vzhledem k současným nařízením a opatřením EU, kdy pro ČR např. plyne požadavek, že v roce 2024 má platit zákaz skládkování recyklovatelných odpadů, bylo podstatou této disertace práce v souladu s Plánem odpadového hospodářství ČR (nyní s POH ČR pro období 2015 - 2024) se snahou minimalizovat množství odpadů s potenciálem jejich dalšího využití.

Na základě výstupů této práce bylo zjištěno, že všechny testované zeminy podle normových požadavků zcela nesplňují všechny parametry pro jejich zpětné použití v konstrukci a byla proto nutná jejich úprava. Vzhledem k povaze zemin (především mineralogickému složení, granulometrii, obsahu vlhkosti a namrzavosti) a na základě normových požadavků, byla jako vhodná úprava navržena stabilizace a následně nová technologie ztekucení.

Z pohledu studované problematiky o účinku pojiv (vápna, cementu) na jednotlivé typy zemin bylo experimentálně prokázáno, že mají tyto příměsi významný stabilizační účinek, který se projevil především na parametru rozlití, pevnosti v tlaku a smrštění navržených samozhutnitelných zálivek. Výsledky výzkumných prací zcela jednoznačně potvrdily, že na rozdíl od cementu mělo významný vliv na chemické atakování jílových minerálů především vzdušné vápno (ViaCalco 90), což se projevilo hlavně u samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl a jílu Cl. Při atakování jílovitých minerálů vápnem (CaO) docházelo v první fázi k výměně volných iontů vápníku (Ca^{2+}) na povrchu jílovitých částic, které v dalších fázích nahrazovaly v krystalové struktuře jílu ionty sodíku (Na^+) a draslíku (K^+). Při tomto procesu docházelo k přeměně vrstevnaté struktury zeminy, která je typická pro jílové minerály, na strukturu zrnitou. Tato reakce byla také ovlivňována přítomností vody (vlhkosti v samozhutnitelné zálivce), díky čemuž docházelo ke vzniku hydratačních produktů (C-S-H a C-A-H gelu), které krystalizovaly ve formě propletené mřížky stejně, jako tomu bylo

u cementu. Účinek cementu se ve srovnání s vápnem výrazně projevil na zvýšení pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek. V první fázi, při přidavku cementu, docházelo k rozpouštění cementových částic, což vedlo k následnému zvýšení iontové koncentrace ve vodním prostředí. Jakmile byla iontová koncentrace dostatečně vysoká, vznikaly v roztoku nasycené sloučeniny, které krystalizovaly a vytvářely propletenou mřížku probíhající skrz zeminu, což se projevilo na výsledných hodnotách pevnosti v tlaku po určité době zrání. Významněji se účinek cementu projevil u samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, ve srovnání se samozhutnitelnými zálivkami na bázi saCl a Cl.

Experimentálně bylo stanoveno, že použitím pojiv (cementu, vápna, v určitém množství, s ohledem na daný typ zeminy) lze dosáhnout u samozhutnitelných zálivek požadovaných hodnot rozlití (SF2 - 660 mm až 750 mm), pevností v tlaku (větších jak 0,14 MPa po třech dnech zrání a větší jak 0,2 MPa po 28 dnech zrání - pro vyhloubitelné zálivky) a snížení smrštění. Ovšem v návaznosti na dosažení hlavního cíle, tedy vyvinutí nové technologie zpětného využití zemin ve formě samozhutnitelných zálivek, byly výzkumné práce dále zaměřeny na zjištění účinku plastifikačních a ztekucujících přísad a příměsí.

Významný vědecký přínos této disertační práce spočívá především v objasnění synergického účinku plastifikačních a především ztekucujících přísad při návrhu samozhutnitelných zálivek. Oproti stávajícím tuzemským i zahraničním zkušenostem s použitím ztekucujících přísad v keramickém průmyslu, pro dosažení optimální konzistence licích břeček na bázi kaolinitu, byla nově zjištěna možnost použití ztekucujících přísad i na neupravené zeminy (na bázi samozhutnitelných zálivek). Z dosažených výsledků této disertační práce bylo jednoznačně prokázáno, že použitím plastifikačních a ztekucujících přísad a příměsí (fluidního popílku), při návrhu samozhutnitelných zálivek na bázi zemin, došlo ke zlepšení parametrů rozlití, pevnosti v tlaku, smrštění a dob tuhnutí, a proto se výslovně doporučuje jejich použití. Množství přísad a příměsí je nutné vždy volit s ohledem na mineralogické složení zemin, což bylo v práci prokázáno. Experimentálně bylo stanoveno, že z vybraných druhů ztekucujících přísad se nejvíce, spolu s jílovými minerály obsaženými v zeminách, projevil synergický účinek ztekucující přísady uhličitanu sodného v množství 0,08 % (z hmot. zeminy). Chemicky se tato reakce projevila vázáním vícemocných kationtů na povrchu micely jílovitých minerálů. Jinak nerozpustná sloučenina (uhličitan sodný Na_2CO_3) při této reakci byla schopna vázat kationty Ca^{2+} a nahradit je za kationty Na^+ ,

což se projevilo výraznějším ztekucením samozhutnitelné zálivky. U plastifikačních přísad se prokázalo, že ochotněji reagovaly s cementem a jako nejúčinnější se pro zlepšení parametrů samozhutnitelných zálivek projevilo použití přísady Sika ViscoCrete – 1062 v množství 3,0 % (z hmot. cementu). Práce rovněž prokázala zlepšení parametrů samozhutnitelných zálivek při použití fluidního popílku, jakožto náhrady primární suroviny (zeminy) v množství do 10 % (s ohledem na ekologická kritéria).

Na základě dosažených výsledků bylo celkovým výsledkem práce vybrání, ze všech navržených samozhutnitelných zálivek, finálních variant receptur, vhodných pro stavební praxi. Celkem bylo vybráno 9 následujících optimálních variant samozhutnitelných zálivek:

- písčitý jíl saCl, 3,0 % vápna, 2 % cementu, 3 % Sika ViscoCrete – 1062,
- písčitý jíl saCl, 3,0 % vápna, 4 % cementu, 3 % Sika ViscoCrete – 1062,
- písčitý jíl saCl, 3,0 % vápna, 2 % cementu, 0,08 % uhličitan sodný,
- písčitý jíl saCl, 3,0 % vápna, 4 % cementu, 0,08 % uhličitanu sodného,
- písčitá zemina fgrCSa, 3,0 % vápna, 4 % cementu, 3 % Sika ViscoCrete – 1062,
- jíl Cl, 3,0 % vápna, 2 % cementu, 0,08 % uhličitanu sodného,
- jíl Cl, 3,0 % vápna, 4 % cementu, 0,08 % uhličitanu sodného,
- písčitý jíl saCl, 4 % cementu, 5 % fluidního popílku,
- písčitý jíl saCl, 4 % cementu, 10 % fluidního popílku.

Experimentálně bylo zároveň na samozhutnitelné zálivce na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 4 % cementu a 0,08 % uhličitanu sodného (z hmot. zeminy) provedeno její ověření in situ. Na základě dosažených výsledků byla jednoznačně prokázána aplikovatelnost zálivky bez nutnosti vibrace, její snadné obtékání IS i v těch méně přístupných místech a vývoj pevnosti v čase.

Z hlediska použitých druhů přísad a příměsí lze konstatovat, že jsou výsledky výzkumných prací této disertace vedoucí k nově vyvinuté technologii samozhutnitelných zálivek na bázi zemin zcela unikátní. A i přes možnou vyšší cenu samozhutnitelných zálivek na bázi zemin, ve srovnání se stávající technologií provádění výkopů inženýrských sítí, bylo prokázáno, že může díky svým výhodám jednoznačně konkurovat technologii zhutňování.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů. Parlament České republiky, 2001.
- [2] KELLER Inc. Keller: *Improvement of Weak Soils by the Deep Soil Mixing Method*. Keller Bronchure, 2019 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <http://keller.co.uk>.
- [3] POSPÍŠIL, P. *Geologie*. Základy petrologie nauky o horninovém prostředí. Modul BF01-M01. Studijní opory, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2004, s. 63.
- [4] Základy regionální geologie České republiky. Textová multimediální část: *Základy regionální geologie České republiky* [online]. Ostrava, 2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/geologie/KAPITOLY/11_REGION%C3%81LN%C3%8D_GEO/11_regionalka.htm.
- [5] MÍSAŘ, Z. a kol. *Geologie ČSSR I. Český masív*. Státní pedagogické nakladatelství, Praha, 1983.
- [6] CHLUPÁČ, I. a kol. *Geologická minulost České republiky*. Academia, Praha, 2002.
- [7] POSPÍŠIL, P. *Geologie - Základy všeobecné a inženýrské geologie a hydrogeologie*. Modul BF01-M02, Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Brno, 2004.
- [8] POSPÍŠIL, P. *Geologie – Základy regionální geologie České Republiky*. Modul BF01-M03, Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Brno, 2004.
- [9] PŘICHYSTAL, A., OBSTOVÁ, V., SUK, M. *Geologie Moravy a Slezska*. Moravské zemské muzeum a Sekce geologie, Věd PřF, MU, Brno, 1993.
- [10] PAŠEK, J., MATULA, M. a kol.: *Inženýrská geologie I., II.* Česká matice technická, Praha, 1995.
- [11] ČSN EN 1997-1 (731000) *Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí - Část 1: Obecná pravidla*, 2006.
- [12] ČSN EN ISO 14688-1 *Geotechnický průzkum a zkoušení - Pojmenování a zařizování zemin - Část 1: Pojmenování a popis*, 2019.
- [13] ČSN EN ISO 14688 – 2 *Geotechnický průzkum a zkoušení - Pojmenování a zařizování zemin - Část 2: Zásady pro zařizování*, 2019.
- [14] ČSN EN ISO 17892-4 *Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 4: Stanovení zrnitosti*, 2017.

- [15] ČSN EN ISO 14689 *Geotechnický průzkum a zkoušení - Pojmenování, popis a klasifikace hornin*, 2019.
- [16] ČSN 73 6133 *Návrh a provádění pozemního tělesa pozemních komunikací*, 2010.
- [17] ČSN EN 1997-2 *Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí – Část 2: Průzkum a zkoušení základové půdy*, 2008.
- [18] TKP 30 – *Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací*. Kapitola 30 Speciální zemní konstrukce. Ministerstvo dopravy, Odbor silniční infrastruktury, ARCADIS Geotechnika, a.s., Praha, 2009.
- [19] ZTKP – *Metodický pokyn k sestavení zvláštních technických kvalitativních podmínek pro dokumentaci stavby pozemní komunikace*. Ministerstvo dopravy, Odbor infrastruktury, Praha, 2008.
- [20] TP 94 – *Technické podmínky 94. Úprava zemin*. Ministerstvo dopravy, Odbor pozemních komunikací, ARCADIS Geotechnika a.s., Praha, 2013.
- [21] ČSN 73 6124-1 *Stavba vozovek – Vrstvy ze směsí stmelých hydraulickými pojivy – Část 1: Provádění a kontrola shody*, 2016.
- [22] ČSN EN 14227-1 *Směsi stmelé hydraulickými pojivy – Specifikace – Část 1: Směsi z kameniva stmelé cementem*, 2013.
- [23] ČSN 73 6126-1 *Stavba vozovek – Nestmelé vrstvy – Část 1: Provádění a kontrola shody*, 2006.
- [24] TKP 3 – *Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací*. Kapitola 3 Odvodnění a chráničky pro inženýrské sítě. Ministerstvo dopravy, Odbor infrastruktury, Praha, 2008.
- [25] Zákon č. 183/2006 Sb. *Zákon o územním plánování a stavebním řádu* (stavební zákon), ve znění pozdějších předpisů, a další související předpisy.
- [26] TP 146 *Povolování a provádění výkopů a zásypů rýh pro inženýrské sítě ve vozovkách pozemních komunikací*. Ministerstvo dopravy české republiky, odbor pozemních komunikací, 2011.
- [27] Zákon č. 13/1997 Sb. *Zákon o pozemních komunikacích*.
- [28] Vyhláška č. 104/1997 Sb. *Vyhláška Ministerstva dopravy a spojů, kterou se provádí zákon o pozemních komunikacích*.
- [29] TP 170 – *Technické podmínky 170. Navrhování vozovek pozemních komunikací*. Ministerstvo dopravy ČR, 2004.

- [30] TP 87 – Technické podmínky 87. *Navrhování údržby a oprav netuhých vozovek*. Ministerstvo dopravy, Odbor silniční infrastruktury, Metodika návrhu oprav vozovek, 2010.
- [31] TKP 4 – Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací. *Kapitola 4 Zemní práce*. Ministerstvo dopravy, Odbor silniční infrastruktury, ARCADIS Geotechnika, a.s., Praha, 2009.
- [32] ČSN EN 1610 *Provádění stok a kanalizačních přípojek a jejich zkoušení*, 2017.
- [33] ČSN 73 6005 *Prostorové uspořádání sítí technického vybavení*, 1994.
- [34] Prosévačka substrátu: *FZ prosévací rotační lžíce pro substrát a zeminu – první v ČR*. Substrát/zemina (nakladače) [online]. Libhošť: FZ Servis®, 2019, 2019 [cit. 2019-07-02]. Dostupné z: <http://www.fzservis.cz/fzservis/3-FOTOGALERIE/22-Substrat-zemina-nakladace>.
- [35] FLEXXIFINGER QD INDUSTRIES INC. *Rock picker, Model flexxifinger® quicker picker* [online]. Canada: © 2019 Flexxifinger QD Industries, 2019 [cit. 2019-07-02]. Dostupné z: <http://flexxifinger.com/Farm-Machinery/Rock-Picker>.
- [36] MEDUNA, P.: *Prosévací lžíce Steelwrist pro rypadla od 3 do 35 tun*. Stavební technika [online]. Hradec Králové: Vega společnost s ručením omezeným, 2017, 2017 [cit. 2019-07-02]. Dostupné z: <https://www.stavebni-technika.cz/clanky/prosevaci-lzice-steelwrist-pro-rypadla-od-3-do-35-tun>.
- [37] Kovo Vikrt: *Vibrační třídiče*. Zakázková kovovýroba [online]. Liteň: KovoVikrt|Copyright©, 2019 [cit. 2019-07-02]. Dostupné z: <http://www.kovovikrt.cz/produkty/vibracni-tridice/#produkt-1>.
- [38] Malostroje.cz: *Půdní fréza* [online]. Brno: © 2019 MALOSTROJE.CZ, 2019, 2019 [cit. 2019-07-02]. Dostupné z: <https://www.malostroje.cz/kontakt/>.
- [39] Cape Cod READY MIX: *Flowable Fill-Crete Project Gallery*. Cape Cod READY MIX [online]. Brewster: ©Cape Cod Ready Mix, 2019 [cit. 2019-07-07]. Dostupné z: <https://www.capecodreadymix.com/flowable-fill-crete/flowable-fill-crete-project-gallery/>.
- [40] MAKUSA, G., P. *Soil stabilization methods and materials: In engineering practice*. Department of Civil, Environmental and Natural resources engineering: Division of Mining and Geotechnical Engineering [online]. Sweden, 2012 [cit. 2019-07-07]. Dostupné z: http://pure.ltu.se/portal/files/42050076/soil_stabilization_methods_and_materials.pdf.
- [41] SHERWOOD, P. *Soil stabilization with cement and lime*. State of the Art Review. London: Transport Research Laboratory, 1993, HMSO.

- [42] Liquid soil - A Technical challenge - UNITRACC - Underground Infrastructure Training and Competence Center [online]. Wiehl, Germany: © 2019 Knowledge Factory GmbH, a subsidiary of Prof. Dr. Ing. Stein & Partner GmbH, 2019 [cit. 2019-07-07]. Dostupné z: <http://www.unitracc.com/aktuelles/artikel/liquid-soil--a-technical-challenge-en>.
- [43] KAUN, M., LEHOVEC, F. *Pozemní komunikace 20*; 2. přeprac. vyd., Praha: ČVUT, 2004, 233 s., ISBN 80-01-02874-7.
- [44] LITTLE, D. N. *Handbook for stabilization of pavement subgrades and base courses with lime*. Dubuque, Iowa: Kendall/Hunt Pub. Co., 1995, 219 s., ISBN 0840396325.
- [45] BELL, F. G. *Ground Engineer's Reference Book*. Butterworths, London, 1987, str. 38/1-17, ISBN-13: 978-0408011730.
- [46] ROGERS, C.D.F. and GLENDINNING, S. *Modification of clay soils using lime*. In C. a. N. Dixon, S. Glendinning, C.D.F. Rogers (Eds.), *Proceeding of the Seminar held at Loughborough University on Lime Stabilization*, London: Thomas Telford, 1996, str. 99-114.
- [47] PACHECO-TORGAL, F. *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*. Edited by: Labrincha, J.A, Leonelli, C., Palomo, A., Chindaprasirt P., Copyright © 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved, 2015, 852 s., ISBN: 978-1-78242-276-1.
- [48] BERGADO, D.T., ANDERSON, L.R., MIURA, N., BALASUBRAMANIAM, A.S. *Soft Ground Improvement in Lowland and Other Environments*. American Society of Civil Engineers – ASCE Press, Reston, 1996.
- [49] DAVIDSON, L.K., DEMIREL, T., HANDY, R.I. *Soil pulverization and lime migration in soil lime stabilisation*. Highway Research Record, 1965, str. 103-126.
- [50] INGLES, O., METCALF, J. *Soil stabilization: principles and practice*. 1972, 374 s. ISBN 04-094-8215-3.
- [51] TP 93 – Technické podmínky 93. *Návrh a provádění staveb pozemních komunikací s využitím popílků a popelů*. Ministerstvo dopravy, Odbor silniční infrastruktury, ARCADIS – Geotechnika, a.s., Praha, 2011.
- [52] FEČKO, P., M. KUŠNIEROVÁ, B. LÝČKOVÁ, V. ČABLÍK, A. FARKAŠOVÁ. *Popílký*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2003, 187 s. ISBN 80-248-0327-5.
- [53] ČECHOVIČ M., KRLIČKOVÁ E., *Je možné použitie fluidného popolčeka v stabilizáciách?* Nové trendy v úpravníctví, VŠB-TU Ostrava, 1996.

- [54] WHITE, D.J., HARRINGTON, D.S., THOMAS, Z. *Fly Ash Soil Stabilization for Non-Uniform Subgrade Soils, Volume I: Engineering properties and construction guidelines*. IHRB Project TR-461, FHWA Project 4, Washington, 2005.
- [55] ÅHNBERG, H. and HOLM, G. *Stabilization of Some Swedish Organic Soils with Different Types of Binders*. Proceeding of Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization, str. 101-108, Stockholm: Balkema, 1999.
- [56] Liquid soil - A Technical challenge - UNITRACC - Underground Infrastructure Training and Competence Center [online]. Wiehl, Germany: © 2019 Knowledge Factory GmbH, a subsidiary of Prof. Dr. Ing. Stein & Partner GmbH, 2019 [cit. 2019-07-23]. Dostupné z: <http://www.unitracc.com/aktuelles/artikel/liquid-soil--a-technical-challenge-en>.
- [57] Florida Concrete and Products Association, Inc., *Flowable fill Demonstration*, RMC 2000, Orlando, FL, 2003.
- [58] American Concrete Institute (ACI) Committee 229, „ACI 229R-94 Report: Controlled Low Strength Materials (CLSM)”, *Concrete International*, Vol. 16, No. 7, Farmington Hills, MI, 1994, str. 55-64.
- [59] HITCH, J. L., “Test Methods for Controlled Low-Strength Material (CLSM): Past, Present, and Future,” *The Design and Application of Controlled Low-Strength Materials (Flowable Fill)*, ASTM STP 1331, A. K. Howard and J. L. Hitch, eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1998.
- [60] NAIK, T. R., KRAUS, R. N., STURZL, R. F., and RAMME, B. W., “Design and Testing Controlled Low-Strength Materials (CLSM) Using Clean Coal Ash,” *The Design and Application of Controlled Low-Strength Materials (Flowable Fill)*, ASTM STP 1331, A. K. Howard and J. L. Hitch, eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1998.
- [61] LOVENCIN, W. *Assessment of design and properties for flowable fill usage in highway pavement construction for conditions in Florida*. University of Florida in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, Civil and Coastal Engineering, Florida, 2007, s. 276.
- [62] CHESNER, W. H., COLLINS, R. J., MacKAY, M. H., et al. *User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction*. Chesner Engineering, P.C. 2171 Jericho Turnpike Commack, NY United States 11725 Federal Highway Administration Turner-Fairbank Highway Research Center, 6300 Georgetown Pike McLean, VA United States 22101, 1998, FHWA-RD-97-148, s. 683.

- [63] NATARAJA, M.C., NALANDA, Y. *Performance of industrial by-products in controlled low-strength materials (CLSM)*. Waste Management, Volume 28, 2007, str. 1168-1181, DOI: 10.1016/j.wasman.2007.03.030.
- [64] AL-HARTHY, A.S., TAHA, R., ABU-ASHOUR, J., AL-JABRI, K., & AL-ORAIMI, S. *Effect of water quality on the strength of flowable fill mixtures*. Cement and Concrete Composites, Volume 27, 2005, str. 33-39, DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2004.01.005.
- [65] DU, L., FOLLIARD, K.J. & TREJO, D. *Effects of constituent materials and quantities on water demand and compressive strength of controlled low-strength material*. Journal of Materials in Civil Engineering, Volume 14, 2002, str. 485-495, [cit. 2019-07-24], Dostupné z: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2002\)14:6\(485\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:6(485)).
- [66] HEGARTY, J.R. & EATON, S.J. *Flowable fill promotes trench safety and supports drainage pipe buried 60 ft under new runway*. In: A.K. Howard & J.L. Hitch (Editors). Proceedings of Design and Application of Controlled Low-Strength Materials (Flowable Fill), ASTM STP 1331, St. Louis, Missouri, 1998, str. 255-264.
- [67] Florida Department of Transportation (FDOT), “*Standard Specifications for Road and Bridge Construction*,” *Flowable Fill Specifications*, Section 121, FDOT Map and Publication Sales, Tallahassee, FL, 2000.
- [68] ASTM C618 - 12a: *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- [69] PYTLÍK, P. *Technologie betonu*. 2. vydání. Brno: VUTIUM, 2000, 390 s., ISBN 80-214-1647-5.
- [70] SEBÖK, T. *Přísady a přídavky do malt a betonů*. 1. vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986, 160 s.
- [71] SOKOLÁŘ, R. *Speciální keramika*. Modul BJ14_M03 – Zdravotnická keramika, porcelán, povrchové úpravy keramiky, hořečnatá keramika. 2006, 64 s.
- [72] HANYKÝŘ, V., KUTZENDÖRFER, J. *Technologie keramiky*. Vyd. 2. Praha: Silikátový svaz, 2008, 387 s. ISBN 978-80-86821-48-1.
- [73] TÁBORSKÝ, T., SCHLATTAUER, P. *Urychlovače tuhnutí a tvrdnutí betonu*. ASB-portal.cz [online]. Bratislava: © JAGA GROUP, 2009 [cit. 2019-07-25]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyroby/beton/urychlovace-tuhnuti-atvrdnuti-betonu>.
- [74] RIXOM, M.R., MAILVAGANAM, N.P. *Chemical Admixtures for Concrete*. E&FN Spon Press, 2nd ed. New York, 1986, ISBN 978-041-9126-300.

- [75] Firth. Firth certified concrete: *Flowable fill* [online]. Penrose, Auckland: Copyright © 2015 Firth., 2019 [cit. 2019-07-23]. Dostupné z: <http://www.firth.co.nz/assets/Uploads/Brochures/Flowable-Fill-Brochure.pdf>.
- [76] SMITH, A. *Controlled Low-Strength Material*. Concrete Construction, V. 36, No.5, 1991, str. 389-398.
- [77] LIANXIANG, D. *Laboratory Investigations of Controlled Low-Strength Material*. Doctoral Dissertation, The University of Texas at Austin, 2001, Dostupné z: <http://catalog.lib.utexas.edu/search/0?searchtype=o&searcharg=50171791>.
- [78] BOUZAKOS, S., DUDENEY, A.W.L. & CHEESMAN, C.R. *Controlled low-strength materials containing waste precipitates from mineral processing*. Minerals Engineering, Volume 21, 2008, str. 252-263.
- [79] GABR, M.A., & BOWDERS, J.J. *Controlled low-strength material using fly ash and AMD sludge*. Journal of Hazardous Materials, Volume 76, 2000, str. 251-263.
- [80] TIKALSKY, P., GAFFNEY, M. & REGAN, R. *Properties of controlled low-strength material containing foundry sand*. ACI Materials Journal, Volume 97, 2000, str. 698-702.
- [81] DOCKTER, B.A. *Comparison of dry scrubber and class C fly ash in controlled lowstrength material (CLSM) applications*. In: A.K. Howard & J.L. Hitch (Editors). Proceedings of Design and Application of Controlled Low-Strength Materials (Flowable Fill), ASTM STP 1331, St. Louis, Missouri, 1998, str.13-26.
- [82] HOOK, W., CLEM, D.A. *Innovative uses of controlled low-strength material (CLSM) in Colorado*. In: A.K. Howard & J.L. Hitch (Editors). Proceedings of Design and Application of Controlled Low-Strength Materials (Flowable Fill), ASTM STP 1331, St. Louis, Missouri, 1998, str.137-150.
- [83] WBM-Flüssigboden. WBM-Flüssigboden hat sich bewährt [online]. Unna: WBM Flüssigboden GmbH, 2019 [cit. 2019-07-25]. Dostupné z: <http://www.wbm-fluessigboden.de/home.html>.
- [84] ČSN EN 12350-8 *Zkoušení čerstvého betonu - Část 8: Samozhutnitelný beton - Zkouška sednutí-rozlítím*, 2010.
- [85] BAKER, T. H. W. "Frost Penetration in Flowable Fill Used in Pipe Trench Backfill." The Design and Application of Controlled Low-Strength Materials (Flowable Fill), ASTM STP 1331, A. K. Howard and J. L. Hitch, eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1998.
- [86] ČSN EN 12350-6 *Zkoušení čerstvého betonu - Část 6: Objemová hmotnost*, 2009.

- [87] ČSN EN 196-3 *Metody zkoušení cementu - Část 3: Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti*, 2017.
- [88] ČSN EN 12390-7 *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*, 2009.
- [89] ČSN EN 12390-3 *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*, 2009.
- [90] ČSN 72 1019 *Laboratorní stanovení smršťování zemin*, 1990.
- [91] ČSN EN ISO 17892-2 *Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 2: Stanovení objemové hmotnosti*, 2015.
- [92] SOKOLÁŘ, R., NEVŘIVOVÁ, L., VODOVÁ, L., GRYGAROVÁ, S. *Žárovzdorné jíly v ČR a metodika posuzování jejich vlastností*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2012, 183 s. ISBN 978-80-7204-817-5.
- [93] ČSN 72 1083 (721083) *Termické rozborý keramických surovin*, 2015.
- [94] ČSN EN 459-1 ed.3 *Stavební vápno - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody*, 2015.
- [95] ČSN EN 1008 *Záměsová voda do betonu - Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu*, 2003.
- [96] MILLS, R. H. *The practitioner's view of fly ash utilization*. Book on Fly Ash and Coal Conversion By-Products: Characterization, Utilization and Disposal VI, Materials Research Society, Pittsburgh, Pennsylvania, 1990.
- [97] DIENHART, G. J., STEWART, B. R. and TYSON, S. S. *Coal Ash: Innovative Applications of Coal Combustion Products*. Book, American Coal Ash Association, Alexandria, VA, 1998.

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

IS	Inženýrské sítě
g...	Štěrkovitá frakce
s...	Písčitá frakce
c...	Jílovitá složka
f...	Jemná/jemnozrnná frakce (do 0,063 mm)
Gr...	Štěrk
fGr...	Štěrk jemnozrnný
Sa...	Písek
cSa...	Písek hrubozrnný
C _u ...	Číslo nestejnozrnitosti
C _c ...	Číslo křivosti
k...	Propustnost [m·s ⁻¹]
d ₆₀ ...	Velikost zrna [mm], odpovídající propadu 60 % odečtenému z čáry zrnitosti
d ₃₀ ...	Velikost zrna [mm], odpovídající propadu 30 % odečtenému z čáry zrnitosti
d ₁₀ ...	Velikost zrna [mm], odpovídající propadu 10 % odečtenému z čáry zrnitosti
S-F...	Písek s příměsí jemnozrnné zeminy
MH...	Hlína s vysokou plasticitou
Cl...	Jíl
S3...	3. třída písčité zeminy
F6...	6. třída jemnozrnné zeminy
F7...	7. třída jemnozrnné zeminy
w _s ...	Mez smrštitelnosti [%]
w _p ...	Mez plasticity [%]
w _l ...	Mez tekutosti [%]
I _p ...	Index plasticity [%]
I _c ...	Číslo (stupeň) konzistence
ρ _{d max} .PS...	Laboratorní srovnávací suchá objemová hmotnost
CBR _{sat} ...	California bearing-ratio, (kalifornský poměr únosnosti - saturační)
IBI...	Immediate bearing index, (okamžitý index účinnosti)
FDTO...	Florida Department of Transportation
E _{def,2} ...	Modul přetvárnosti
β...	Namrzavost
Ca(OH) ₂ ...	Hydroxid vápenatý
CaO...	Oxid vápenatý
CaCO ₃ ...	Uhličitán vápenatý, (kalcit)
Ca ²⁺ ...	Kationt vápenatý
Na ⁺ ...	Kationt sodný
K ⁺ ...	Kationt draselný
Al ³⁺ ...	Kationt hlinitý
Mg ²⁺ ...	Kationt hořečnatý

$\text{NH}^{4+} \dots$	Kationt amonný
$\text{H}^+ \dots$	Kationt vodíku
$\text{SiO}_2 \dots$	Oxid křemičitý
$\text{Al}_2\text{O}_3 \dots$	Oxid hlinitý
$\text{H}_2\text{O} \dots$	Voda
$\text{C-S-H} \dots$	Kalcium hydrosilikát
$\text{C-A-H} \dots$	Kalcium hydroaluminát
$\text{C}_3\text{S} \dots$	Trikalcium silikát
$\text{C}_2\text{S} \dots$	Dikalcium silikát
$\text{C}_3\text{A} \dots$	Trikalcium aluminát
$\text{C}_4\text{AF} \dots$	Tetrakalciumaluminát ferrit
$2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \dots$	Mullit
$\text{Na}_2\text{CO}_3 \dots$	Bezvodá soda
$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \dots$	Vodní sklo
$\text{Na}_6(\text{PO}_3)_6 \dots$	Hexametafosforečnan sodný
$\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \dots$	Polyfosforečnan sodný
$\text{Na}_2(\text{COO})_2$	Šťavelan amonný
$\text{NaSCN} \dots$	Thiokyanatan sodný
$\text{Ca}(\text{SCN})_2 \dots$	Thiokyanatan amonný
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \dots$	Dusičnan vápenatý
$\text{K}_2\text{SO}_4 \dots$	Síran draselný
CLSM...	Controlled low strength materiál
ACI...	American Concrete Institute
CDF...	Controlled density fill
saCl...	Písčité jíl
fgrCSa...	Písčité zemina
ASTM...	American Society for Testing and Materials
TKP...	Technické kvalitativní podmínky
TP...	Technické podmínky
SF...	Sednutí rozlitém [mm]
$d_1 \dots$	největší průměr rozlité [mm]
$d_2 \dots$	průměr rozlité ve směru kolmém k d_1 [mm]
$D \dots$	Objemová hmotnost čerstvé samozhutnitelné zálivky [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
$m_1 \dots$	Hmotnost prázdné nádoby [kg]
$m_2 \dots$	Hmotnost naplněné nádoby se samozhutnitelnou zálivkou [kg]
$V \dots$	Objem nádoby/vzorku [m^3]
$m \dots$	Hmotnost zkušebního tělesa po určité době zrání [kg]
$f_c \dots$	Pevnost v tlaku [MPa; $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$]
$F \dots$	Maximální zatížení při porušení [N]
$A_c \dots$	Průřezová plocha zkušebního tělesa [mm^2]
$S_1 \dots$	Délkové smrštění [mm]

l...	Původní délka zkušebního vzorku [mm]
li...	Měřená délka zkušebního vzorku [mm]
w...	Vlhkost [%]
m _d ...	Hmotnost vzorku po určité době zrání [g]
a...	Původní délka [mm]
a _i ...	Délka po smrštění [mm]
RTG...	Rentgenová difrakční analýza
DTA...	Diferenční termická analýza
FA...	Fluidní popílek
zž...	Ztráta žíháním

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Klasifikace složek zemin podle velikosti částic [16]	13
Tab. 2: Rozdělení zrn a frakcí zemin [12]	14
Tab. 3: Klasifikace štěrkovitých zemin [11]	16
Tab. 4: Klasifikace písčitých zemin [11]	16
Tab. 5: Rozlišení plasticity v závislosti na mezi tekutosti (w_L) [11]	17
Tab. 6: Klasifikace jemnozrnných zemin [12]	18
Tab. 7: Vhodnost použití zemin pro pozemní komunikace [16]	20
Tab. 8: Použitelnost zemin pro stavbu zemního tělesa [16]	21
Tab. 9: Nejmenší dovolené krytí podzemních sítí [33]	27
Tab. 10: Požadavky na specifikace materiálů podle FDOT [67]	53
Tab. 11: Návrh ztekucené zálivky podle FDOT [67]	53
Tab. 12: Zkušební metody samozhutnitelných zálivek podle ASTM [62]	70
Tab. 13: Zkušební metody určené pro samozhutnitelné zálivky	71
Tab. 14: Hodnoty třídy sednutí-rozlitím SF [84]	72
Tab. 15: Výsledky laboratorních zkoušek zeminy F6 Cl = saCl	82
Tab. 16: Výsledky laboratorních zkoušek zeminy S3 S-F = fgrCSa	84
Tab. 17: Výsledky laboratorních zkoušek zeminy F7 MH = Cl	86
Tab. 18: Chemické složení fluidního popílku (FA)	94
Tab. 19: Počátek a konec tuhnutí samozhutnitelných zálivek	132
Tab. 20: Vybrané samozhutnitelné zálivky pro RTG difrakční analýzu	134
Tab. 21: Vybrané samozhutnitelné zálivky pro DTA analýzu	135
Tab. 22: Výsledné hodnoty množství C-S-H, portlanditu a kalcitu v samozhutnitelné zálivce	137
Tab. 23: Optická mikroskopie vybraných samozhutnitelných zálivek	138
Tab. 24: Rastrovací elektronová mikroskopie vybraných samozhutnitelných zálivek	139
Tab. 25: Počátek a konec tuhnutí samozhutnitelných zálivek s použitím přísad a příměsí ...	183
Tab. 26: Ceny použitých surovin samozhutnitelných zálivek	202

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Klasifikační diagram zemin s částicemi < 60 mm [12]	15
Obr. 2: Diagram plasticity pro zeminy s částicemi menšími než 0,5 mm [11]	17
Obr. 3: Provedení výkopu a zásypu IS	25
Obr. 4: Hutnění zásypového materiálu	25
Obr. 5: Obecné schéma uložení potrubí z polypropylenu [32]	27
Obr. 6: Obsah organických látek v zemině v množství větším než 6 %	28
Obr. 7: Kontaminovaná zemina a její odvoz na skládku	28
Obr. 8: Prosévací rotační lžíce [34]	29
Obr. 9: Nástavce na prosévací rotační lžíce Flexxifinger® quicker picker [35]	29
Obr. 10: Varianta prosévací lžíce se zuby a vyztuženými bočními břity pro až 35tunová rypadla [36]	30
Obr. 11: Varianta prosévací lžíce pro minirypadla 3–6 tun s hladkým břitem [36]	30
Obr. 12: Dvojsytný vibrační třídič sypkých materiálů MoleScreen Middle [37]	30
Obr. 13: Vibrační třídič na podvozku - MoleScreen trailer [37]	30
Obr. 14: Půdní drtič [38]	31
Obr. 15: Plnění autodomíchávače [39]	32
Obr. 16: Schéma znázorňující výměnu kationtů v zemině, k níž dochází okamžitě po smíchání pojivá (vápna, cementu) se zeminou [47]	38
Obr. 17: Ukázka stavu zeminy a) před flokulací a b) po flokulaci [47]	39
Obr. 18: Vývoj tepla při hydrataci obyčejného portlandského cementu při 20 °C a poměru vody ku cementu $w/c=0,4$. I, II, III – dosažení třech maxim při hydratační reakci. [47] 40	
Obr. 19: Vytváření cementových produktů formovaných během hydratace a dlouhodobých pucolánových reakcí [47]	41
Obr. 20: Typický příklad stavu zeminy smíchané s cementem a) před hydratací a b) po několika týdnech vytvrzování, kdy cement reagoval se zeminou za vzniku C-S-H a C-A-H gelů [47]	45
Obr. 21: Upevnění trub (potrubí) [42]	60
Obr. 22: Schéma postupu řešení předkládané disertační práce – etapa I	64
Obr. 23: Schéma postupu řešení předkládané disertační práce – etapa II	66
Obr. 24: Schéma postupu řešení předkládané disertační práce – etapa III	68
Obr. 25: Schéma postupu řešení předkládané disertační práce – etapa IV	69
Obr. 26: Podkladní deska a kužel pro stanovení zkoušky rozlití	71

Obr. 27: Aparatura pro měření rozlití (ASTM D 6103-96) [85].....	72
Obr. 28: Boční pohled s prstencem ve výchozí poloze pro stanovení počátku tuhnutí [87]....	74
Obr. 29: Přední pohled s prstencem v obrácené poloze pro stanovení konce tuhnutí [87].....	74
Obr. 30: Jehla s nástavcem pro stanovení konce tuhnutí [87].....	74
Obr. 31: Zkušební lis	75
Obr. 32: Přístroj Panalytical Empyrean pro stanovení mineralogického složení.....	76
Obr. 33: Přístroj Mettler Toledo TGA/DSC 1	77
Obr. 34: Digitální mikroskop VHX-950F	77
Obr. 35: Rastrovací elektronový mikroskop Tescan Mira3 XMU	78
Obr. 36: Geologická mapa města Brna	80
Obr. 37: Zemina z lokality Brno - Černovice.....	80
Obr. 38: Zemina z lokality Brno – ul. Provazníková	80
Obr. 39: Zemina z lokality Brno – Medlánky	80
Obr. 40. Křivka zrnitosti zeminy z lokality Brno – Medlánky	82
Obr. 41. Křivka zrnitosti zeminy z lokality Brno-Černovice	84
Obr. 42. Křivka zrnitosti zeminy z lokality Brno – ul. Provazníková.....	86
Obr. 43. Shlukování částic jílu Cl míchaného s nehašeným vápnem	97
Obr. 44. Rozlití směsí dle ČSN EN 12350-8 (modře je označena zemina míchaná ihned s vápnem, zeleně je označena zemina míchaná 24 h předem s vápnem)	97
Obr. 45. Rozlití směsí JZVC	99
Obr. 46. Rozlití směsí PZVC	99
Obr. 47. Pevnost v tlaku směsí dle ČSN EN 12390-3 (modře je označena zemina míchaná ihned s vápnem, zeleně je označena zemina míchaná 24 h předem s vápnem)	99
Obr. 48. Závislost rozlití na vlhkosti směsí na bázi saCl a 0 % – 8 % cementu	101
Obr. 49. Závislost rozlití na vlhkosti směsí na bázi saCl, 1,5 % vápna a 0 % - 8 % cementu	102
Obr. 50. Závislost rozlití na vlhkosti směsí na bázi saCl, 3,0 % vápna a 0 % - 8 % cementu	102
Obr. 51. Výsledky objemových hmotností čerstvých a zatvrdlých směsí na bázi saCl a 0 % - 8 % cementu.....	104
Obr. 52. Výsledky objemových hmotností čerstvých a zatvrdlých směsí na bázi saCl, 1,5 % vápna a 0 % - 8 % cementu.....	105
Obr. 53. Výsledky objemových hmotností čerstvých a zatvrdlých směsí na bázi saCl, 3,0 % vápna a 0 % - 8 % cementu.....	105

Obr. 54. Hodnoty pevností v tlaku směsí na bázi saCl a 0 % – 8 % cementu	107
Obr. 55. Hodnoty pevností v tlaku směsí na bázi saCl, 1,5 % vápna a 0 % – 8 % cementu..	108
Obr. 56. Hodnoty pevností v tlaku směsí na bázi saCl, 3,0 % vápna a 0 % – 8 % cementu..	108
Obr. 57. Závislost smrštění na vlhkosti směsí na bázi saCl a 0 % – 8 % cementu	110
Obr. 58. Závislost smrštění na vlhkosti směsí na bázi saCl, 1,5 % vápna a 0 % – 8 % cementu	111
Obr. 59. Závislost smrštění na vlhkosti směsí na bázi saCl, 3,0 % vápna a 0 % – 8 % cementu	111
Obr. 60. Závislost rozlití na vlhkosti směsí na bázi fgrCSa a 0 % – 8 % cementu	113
Obr. 61. Závislost rozlití na vlhkosti směsí na bázi fgrCSa, 1,5 % vápna a 0 % – 8 % cementu	113
Obr. 62. Závislost rozlití na vlhkosti směsí na bázi fgrCSa, 3,0 % vápna a 0 % – 8 % cementu	114
Obr. 63. Výsledky objemových hmotností čerstvých a zatvrdlých směsí na bázi fgrCSa a 0 % – 8 % cementu	115
Obr. 64. Výsledky objemových hmotností čerstvých a zatvrdlých směsí na bázi fgrCSa, 1,5 % vápna a 0 % – 8 % cementu	116
Obr. 65. Výsledky objemových hmotností čerstvých a zatvrdlých směsí na bázi fgrCSa, 3,0 % vápna a 0 % – 8 % cementu	116
Obr. 66. Hodnoty pevností v tlaku směsí na bázi fgrCSa a 0 % – 8 % cementu	118
Obr. 67. Hodnoty pevností v tlaku směsí na bázi fgrCSa, 1,5 % vápna a 0 % – 8 % cementu	118
Obr. 68. Hodnoty pevností v tlaku směsí na bázi fgrCSa, 3,0 % vápna a 0 % – 8 % cementu	119
Obr. 69. Závislost smrštění na vlhkosti směsí na bázi fgrCSa a 0 % – 8 % cementu	120
Obr. 70. Závislost smrštění na vlhkosti směsí na bázi fgrCSa, 1,5 % vápna a 0 % – 8 % cementu	121
Obr. 71. Závislost smrštění na vlhkosti směsí na bázi fgrCSa, 3,0 % vápna a 0 % – 8 % cementu	121
Obr. 72. Závislost rozlití na vlhkosti směsí na bázi jílu Cl a 0 % – 8 % cementu	123
Obr. 73. Závislost rozlití na vlhkosti směsí na bázi jílu Cl, 1,5 % vápna a 0 % – 8 % cementu	123
Obr. 74. Závislost rozlití na vlhkosti směsí na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna a 0 % – 8 % cementu	124

Obr. 75. Výsledky objemových hmotností čerstvých a zatvrdlých směsí na bázi jílu Cl a 0 % – 8 % cementu	125
Obr. 76. Výsledky objemových hmotností čerstvých a zatvrdlých směsí na bázi jílu Cl, 1,5 % vápna a 0 % – 8 % cementu	126
Obr. 77. Výsledky objemových hmotností čerstvých a zatvrdlých směsí na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna a 0 % – 8 % cementu	126
Obr. 78. Hodnoty pevností v tlaku směsí na bázi jílu Cl a 0 % – 8 % cementu	127
Obr. 79. Hodnoty pevností v tlaku směsí na bázi jílu Cl, 1,5 % vápna a 0 % – 8 % cementu	128
Obr. 80. Hodnoty pevností v tlaku směsí na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna a 0 % – 8 % cementu	128
Obr. 81. Závislost smrštění na vlhkosti směsí na bázi jílu Cl a 0 % – 8 % cementu	129
Obr. 82. Závislost smrštění na vlhkosti směsí na bázi jílu Cl, 1,5 % vápna a 0 % – 8 % cementu	130
Obr. 83. Závislost smrštění na vlhkosti směsí na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna a 0 % – 8 % cementu	130
Obr. 84. Ověření účinku dispergačních činidel s jílovitou zeminou saCl.....	145
Obr. 85. Závislost rozlití na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 % cementu a 0-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062	148
Obr. 86. Závislost rozlití na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 4 % cementu a 0-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062	148
Obr. 87. Závislost rozlití na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 a 4 % cementu a 0,08 % uhličitane sodného (sody).....	149
Obr. 88. Objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062	151
Obr. 89. Objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 4 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062	151
Obr. 90. Objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 a 4 % cementu a 0,08 % uhličitane sodného (sody).....	152
Obr. 91. Pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062	153
Obr. 92. Pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 4 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062	154

Obr. 93. Pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 a 4 % cementu a 0,08 % uhličitanu sodného (sody).....	154
Obr. 94. Závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062.....	156
Obr. 95. Závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 4 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062.....	156
Obr. 96. Závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 a 4 % cementu a 0,08 % uhličitanu sodného (sody).....	157
Obr. 97. Závislost rozlití na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % cementu a 0-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062.....	159
Obr. 98. Objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062.....	161
Obr. 99. Pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % cementu a 1 - 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062.....	162
Obr. 100. Závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % cementu a 1 - 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062.....	164
Obr. 101. Závislost rozlití na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 2 % cementu, 0–3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062.....	166
Obr. 102. Závislost rozlití na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi Cl, 3,0 % vápna, 4 % cementu, 0–3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062.....	166
Obr. 103. Závislost rozlití na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 2 a 4 % cementu, 0,08 % uhličitanu sodného.....	167
Obr. 104. Objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 2 % cementu, 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062.....	169
Obr. 105. Objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 4 % cementu, 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062.....	169
Obr. 106. Objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 2 a 4 % cementu, 0,08 % uhličitanu sodného.....	170
Obr. 107. Pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 2 % cementu, 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062.....	171
Obr. 108. Pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 4 % cementu, 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062.....	172

Obr. 109. Pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 2 a 4 % cementu, 0,08 % uhličitanu sodného.....	172
Obr. 110. Závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 2 % cementu, 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062	174
Obr. 111. Závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 4 % cementu, 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062	174
Obr. 112. Závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 2 a 4 % cementu, 0,08 % uhličitanu sodného.....	175
Obr. 113. Stanovení sednutí-rozlitím dle ČSN EN 12350-8.....	178
Obr. 114. Stanovení pevnosti v tlaku dle ČSN EN 12390-3.....	178
Obr. 115. Závislost rozlití na vlhkosti samozhutnitelných zálivek s použitím fluidního popílku.....	179
Obr. 116. Pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek s použitím fluidního popílku, po 7 dnech zrání	181
Obr. 117. Ubíjení pomocí vibrační desky	191
Obr. 118. Zhutňování materiálu vibrační deskou.....	191
Obr. 119. Odvážení nevhodné zeminy	192
Obr. 120. Skládání zemin.....	192
Obr. 121. Nevhodné zeminy pro zhutňování (vlevo od výkopu), vhodné materiály pro zhutňování (vpravo od výkopu)	192
Obr. 122. Technologie zhutňování zemin	193
Obr. 123. Technologie samozhutnitelných zálivek	193
Obr. 124. Rotační lžíce Flexxifinger® quicker picker [35]	194
Obr. 125. Prosévací lžíce [36].....	194
Obr. 126. Ošetření zeminy vápnem.....	196
Obr. 127. Míchačka s nuceným oběhem	196
Obr. 128. Dávkování složek do míchačky	196
Obr. 129. Ověřování konzistence	196
Obr. 130. Stabilizace trub zásypem.....	198
Obr. 131. Stabilizace trub shora [42]	198
Obr. 132. Výkop s vloženou instalací	204
Obr. 133. Ruční míchání zeminy s vápnem	204
Obr. 134. Míchačka na zeminy opatřena na horní straně sítím	204
Obr. 135. Stanovení hodnoty rozlití směsí.....	205

Obr. 136. Stanovení hodnoty rozlití směsi	205
Obr. 137. Odlévání směsi	205
Obr. 138. Odběr vzorků směsi	205
Obr. 139. Snadné obtékání směsi	206
Obr. 140. Zrání směsi v čase	206

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 Rentgenogram RTG difrakční analýzy písčitého jílu saCl

Příloha č. 2 Rentgenogram RTG difrakční analýzy písčité zeminy fgrCSa

Příloha č. 3 Rentgenogram RTG difrakční analýzy jílu Cl

Příloha č. 4 Rentgenogram RTG difrakční analýzy samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl a 1,5 % vápna

Příloha č. 5 Rentgenogram RTG difrakční analýzy samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl a 4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R

Příloha č. 6 Rentgenogram RTG difrakční analýzy samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl a 8 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R

Příloha č. 7 Rentgenogram RTG difrakční analýzy samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl, 1,5 % vápna a 4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R

Příloha č. 8 Rentgenogram RTG difrakční analýzy samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl, 1,5 % vápna a 8 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R

Příloha č. 9 Rentgenogram RTG difrakční analýzy samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl a 3,0 % vápna

Příloha č. 10 Rentgenogram RTG difrakční analýzy samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna a 2 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R

Příloha č. 11 Rentgenogram RTG difrakční analýzy samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna a 4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R

Příloha č. 12 Rentgenogram RTG difrakční analýzy samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna a 6 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R

Příloha č. 13 Rentgenogram RTG difrakční analýzy samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna a 8 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R

Příloha č. 14 DTA a TG křivky samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl a 1,5 % vápna

Příloha č. 15 DTA a TG křivky samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl a 4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R

Příloha č. 16 DTA a TG křivky samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl a 8 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R

Příloha č. 17 DTA a TG křivky samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl, 1,5 % vápna a 4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R

Příloha č. 18 DTA a TG křivky samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl, 1,5 % vápna a 8 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R

Příloha č. 19 DTA a TG křivky samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl a 3,0 % vápna

Příloha č. 20 DTA a TG křivky samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna a 2 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R

Příloha č. 21 DTA a TG křivky samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna a 4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R

Příloha č. 22 DTA a TG křivky samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna a 6 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R

Příloha č. 23 DTA a TG křivky samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna a 8 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R

Příloha č. 24 Optická mikroskopie vybraných samozhutnitelných zálivek

Příloha č. 25 Rastrovací elektronová mikroskopie vybraných samozhutnitelných zálivek

Příloha č. 26 a) Závislost rozlití na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 % cementu a 0-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 21

Příloha č. 26 b) Závislost rozlití na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 % cementu a 0-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 4088

Příloha č. 26 c) Závislost rozlití na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 6 % cementu a 0-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062

Příloha č. 26 d) Závislost rozlití na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 8 % cementu a 0-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062

Příloha č. 26 e) Objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 21

Příloha č. 26 f) Objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 4088

Příloha č. 26 g) Objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 6 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062

Příloha č. 26 h) Objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 8 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062

Příloha č. 26 i) Pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 21

Příloha č. 26 j) Pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 4088

Příloha č. 26 k) Pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 6 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062

Příloha č. 26 l) Pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 8 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062

Příloha č. 26 m) Závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 21

Příloha č. 26 n) Závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 4088

Příloha č. 26 o) Závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 6 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062

Příloha č. 26 p) Závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 8 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062

Příloha č. 27 a) Závislost rozlití na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % cementu a 0-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 21

Příloha č. 27 b) Závislost rozlití na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % cementu a 0-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 4088

Příloha č. 27 c) Závislost rozlití na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 6 % cementu a 0-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062

Příloha č. 27 d) Závislost rozlití na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 8 % cementu a 0-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062

Příloha č. 27 e) Objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 21

Příloha č. 27 f) Objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 4088

Příloha č. 27 g) Objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 6 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062

Příloha č. 27 h) Objemové hmotnosti na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 8 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062

Příloha č. 27 i) Pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 21

Příloha č. 27 j) Pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 4088

Příloha č. 27 k) Pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 6 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062

Příloha č. 27 l) Pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 8 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062

Příloha č. 27 m) Závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 21

Příloha č. 27 n) Závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 4088

Příloha č. 27 o) Závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 6 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062

Příloha č. 27 p) Závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 8 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062

Příloha č. 28 a) Závislost rozlití na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi Cl, 3,0 % vápna, 6 % cementu, 0–3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062

Příloha č. 28 b) Závislost rozlití na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi Cl, 3,0 % vápna, 8 % cementu, 0–3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062

Příloha č. 28 c) Objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 6 % cementu, 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062

Příloha č. 28 d) Objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 8 % cementu, 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062

Příloha č. 28 e) Pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 6 % cementu, 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062

Příloha č. 28 f) Pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 8 % cementu, 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062

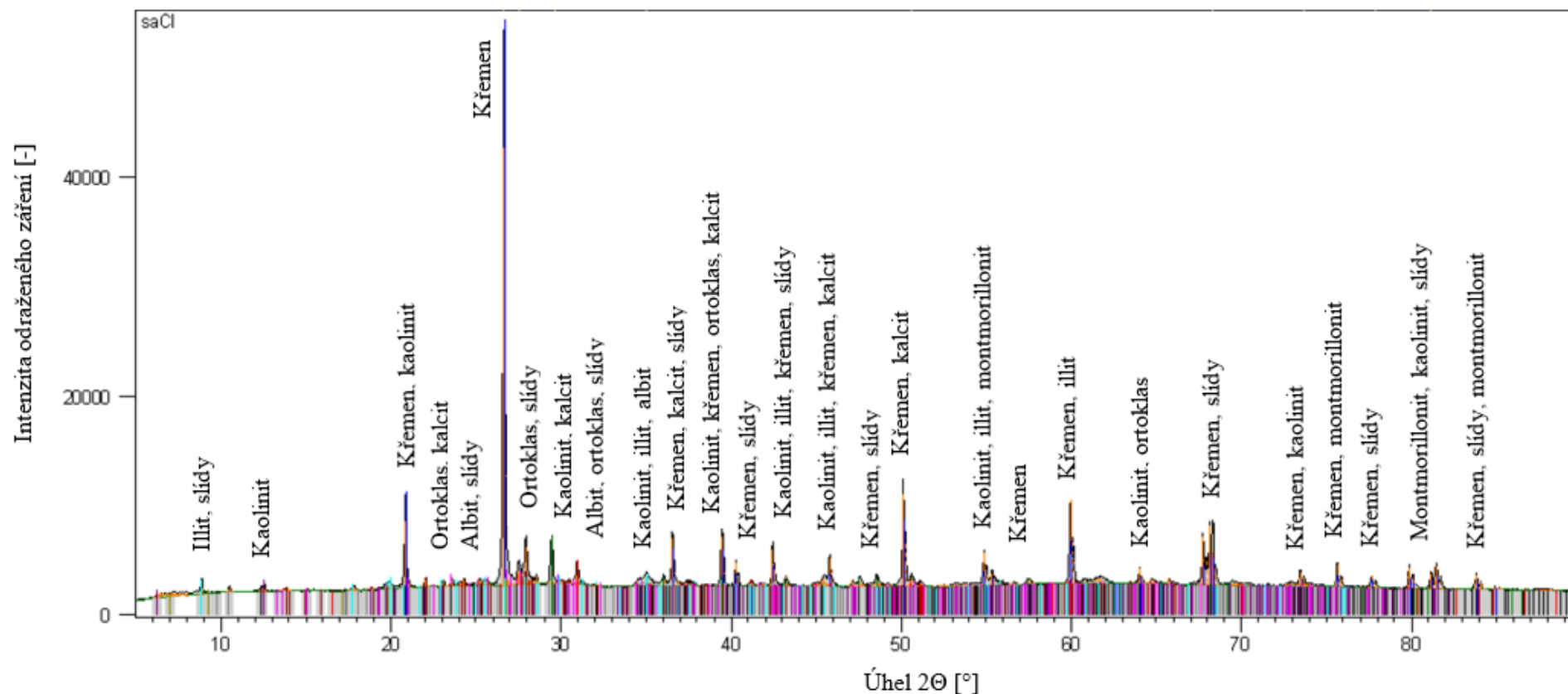
Příloha č. 28 g) Závislosti smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 6 % cementu, 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062

Příloha č. 28 h) Závislosti smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 8 % cementu, 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062

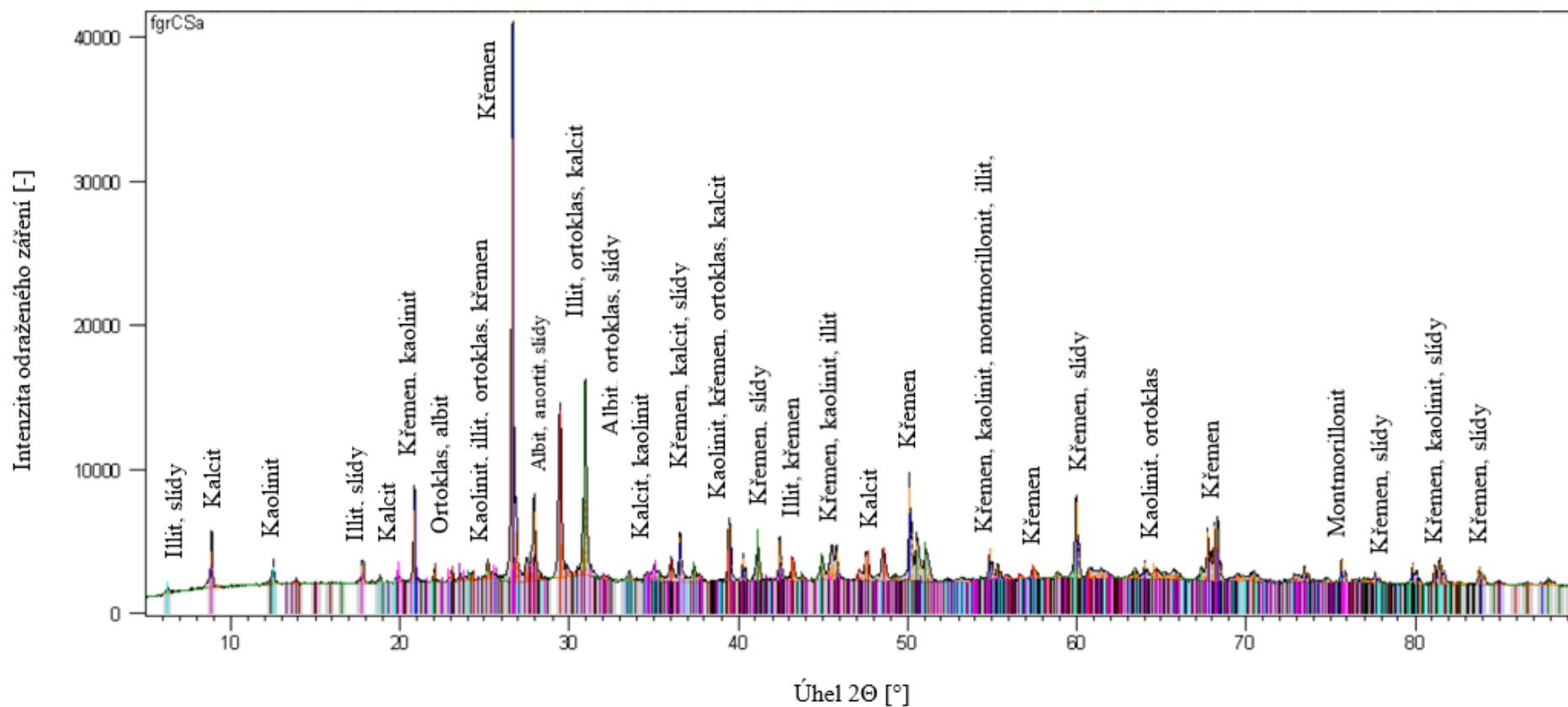
Příloha č. 29 Rastrovací elektronová mikroskopie vybraných samozhutnitelných zálivek

PŘÍLOHY

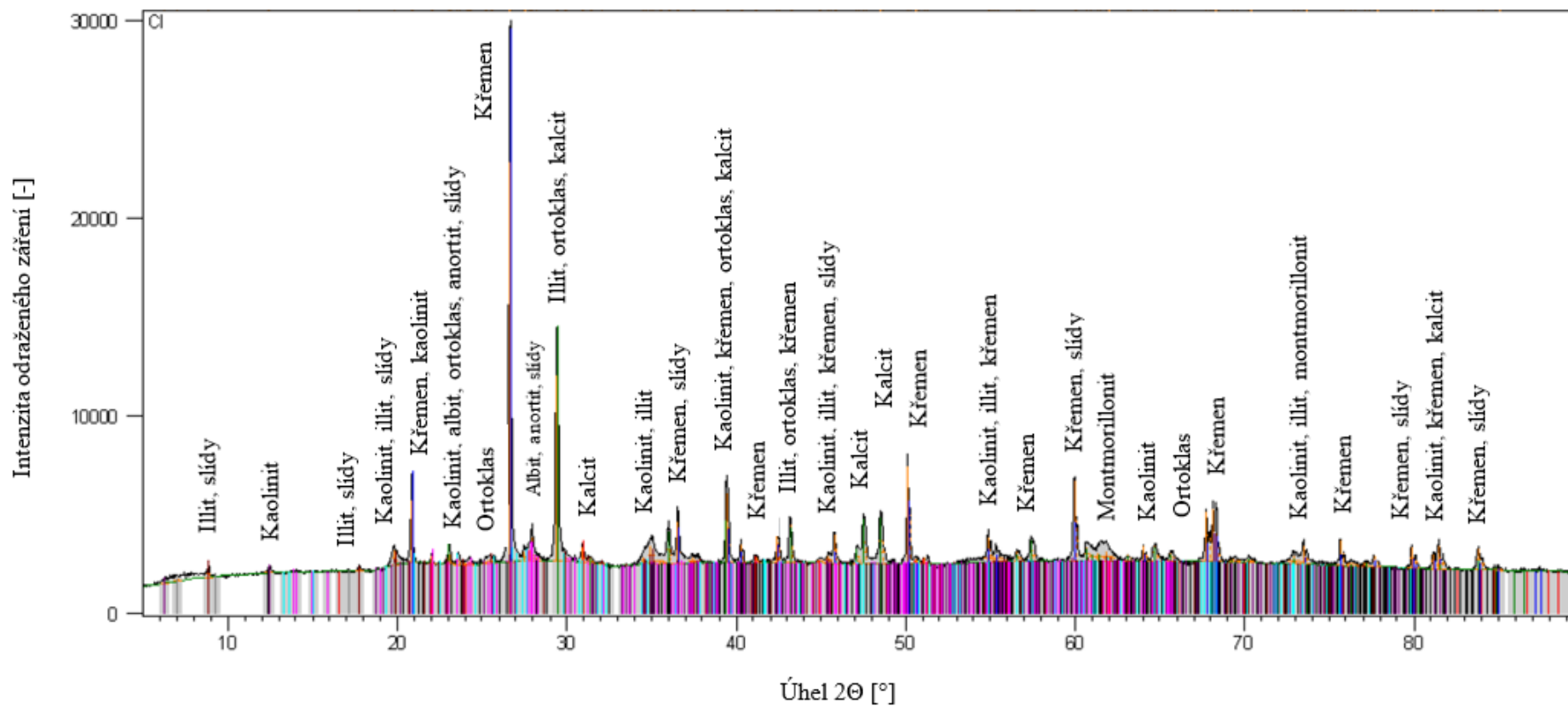
Příloha č. 1 Rentgenogram RTG difrakční analýzy písčitého jílu saCl



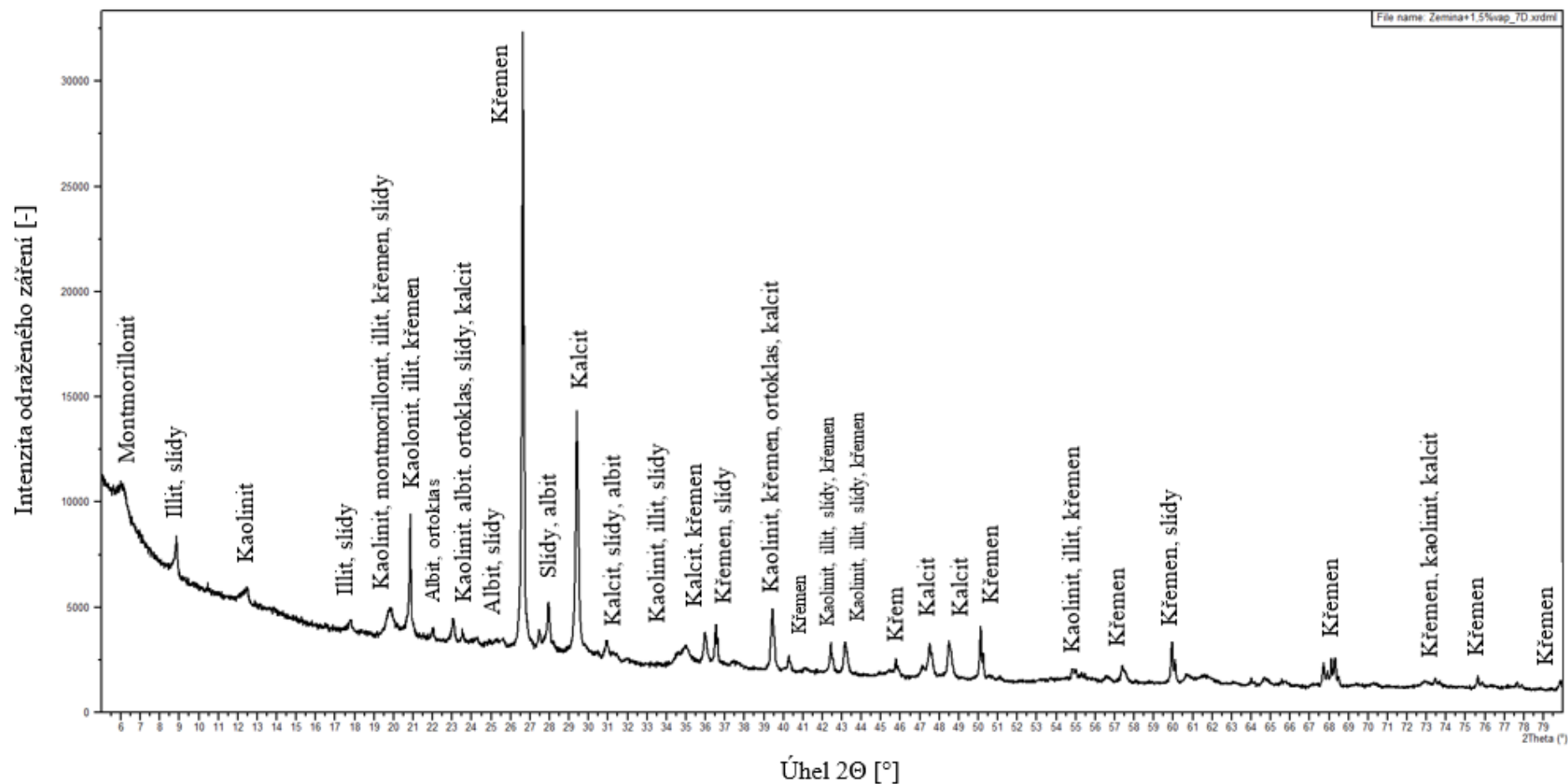
Příloha č. 2 Rentgenogram RTG difrakční analýzy písčité zeminy fgrCSa



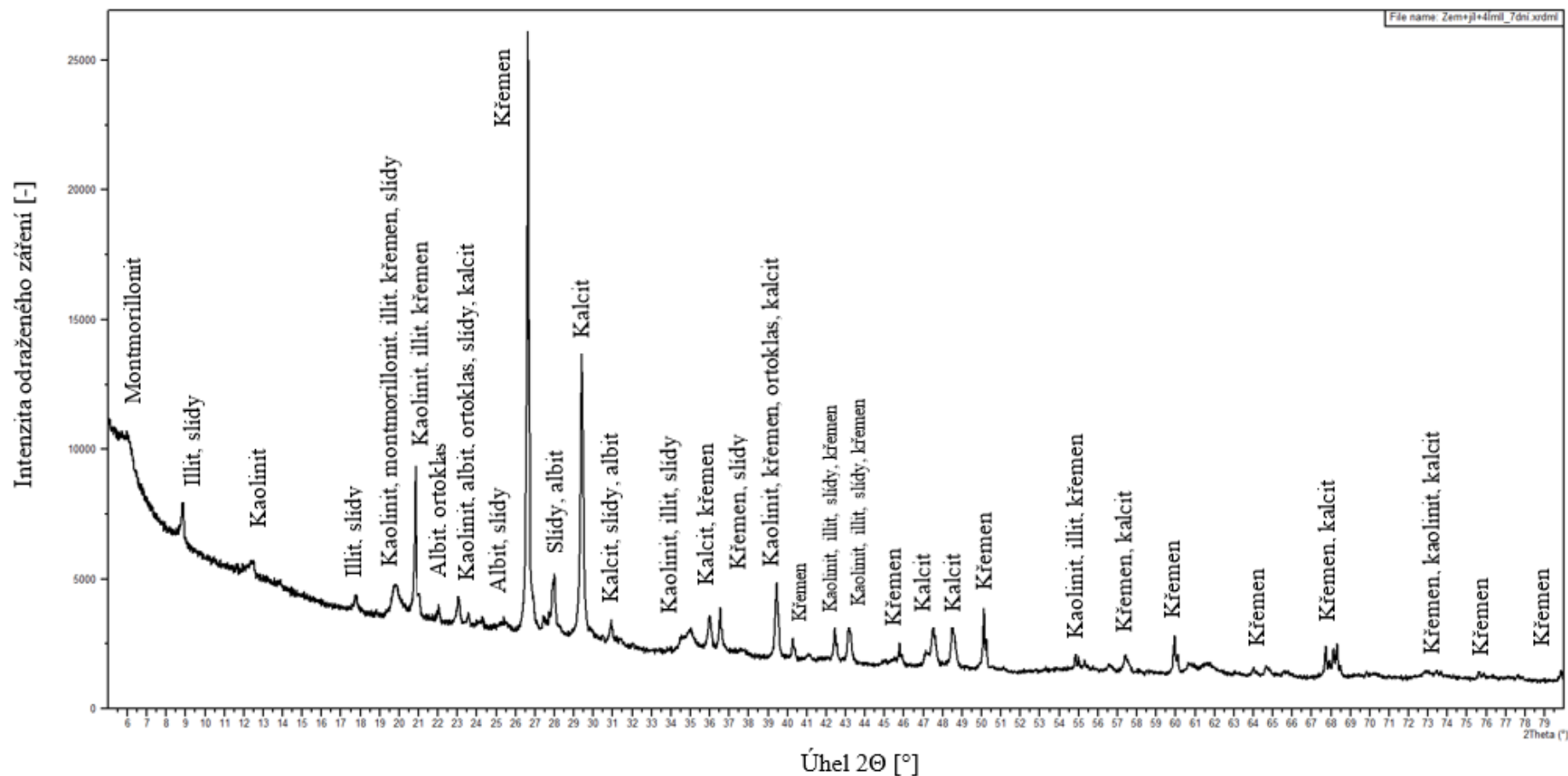
Příloha č. 3 Rentgenogram RTG difrakční analýzy jílu Cl



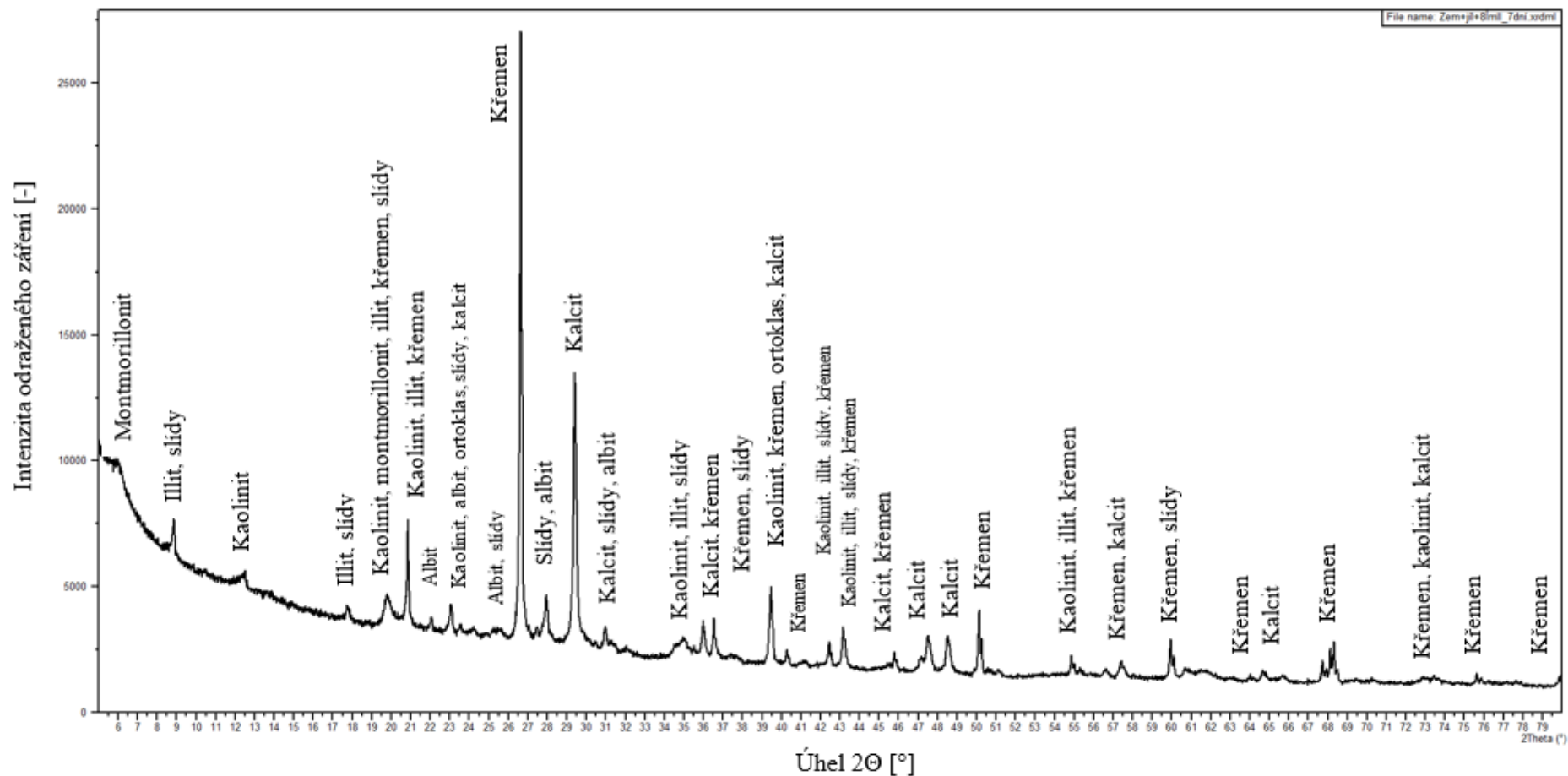
Příloha č. 4 Rentgenogram RTG difrakční analýzy samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl a 1,5 % vápna



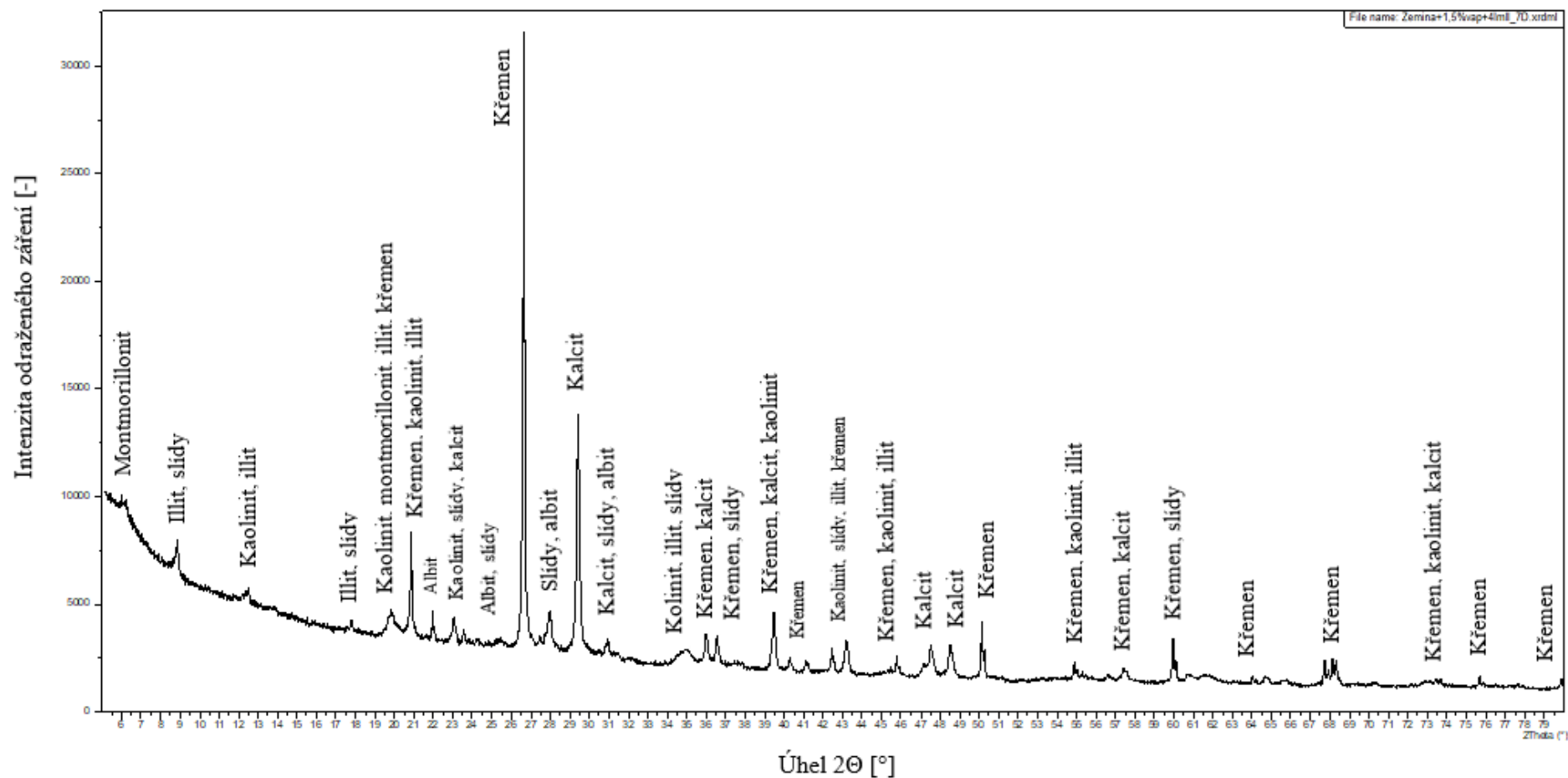
Příloha č. 5 Rentgenogram RTG difrakční analýzy samozhutnitelné zálivky na bázi jílu C1
a 4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R



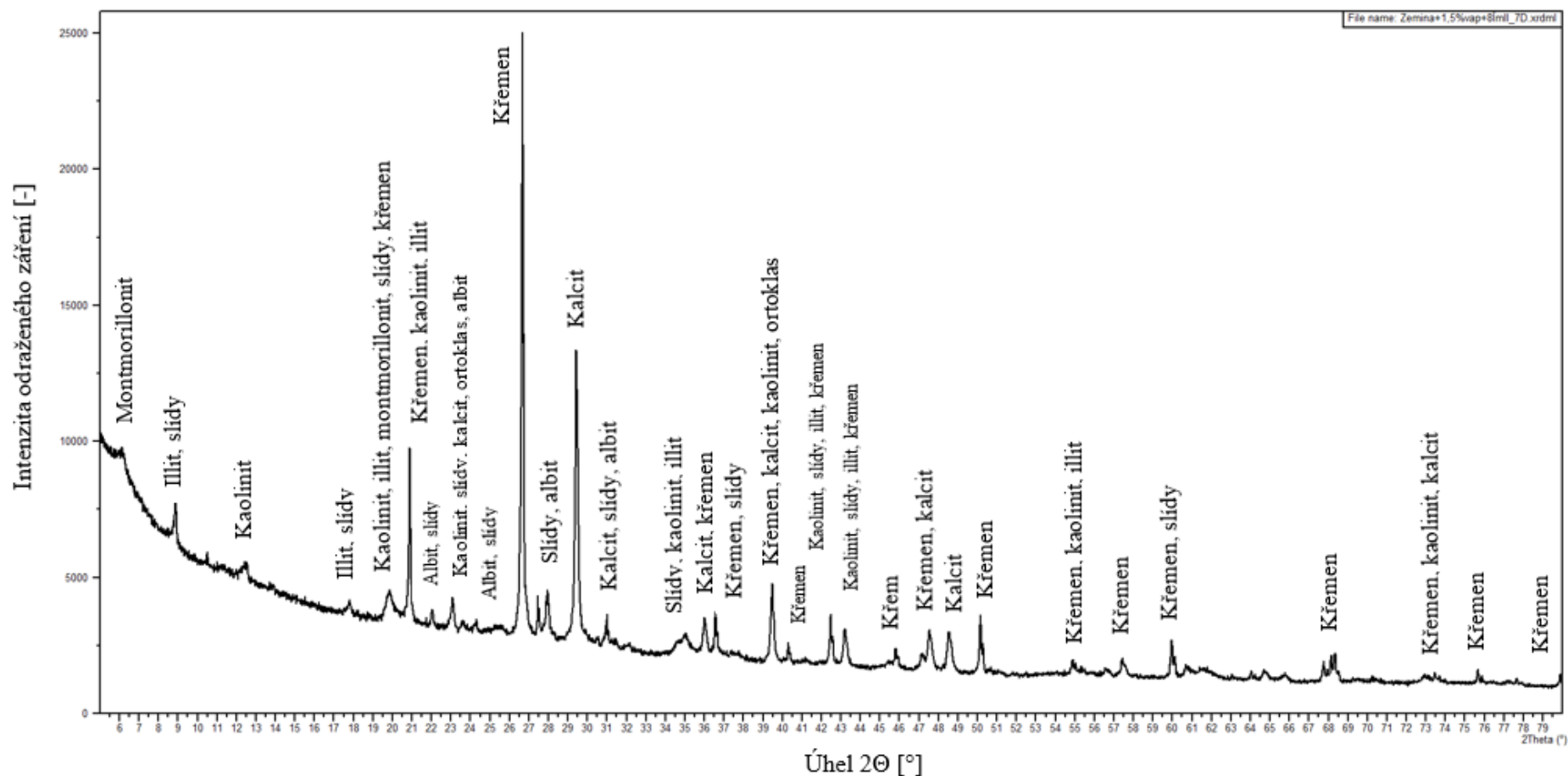
Příloha č. 6 Rentgenogram RTG difrakční analýzy samozhutnitelné zálivky na bázi jílu CI
a 8 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R



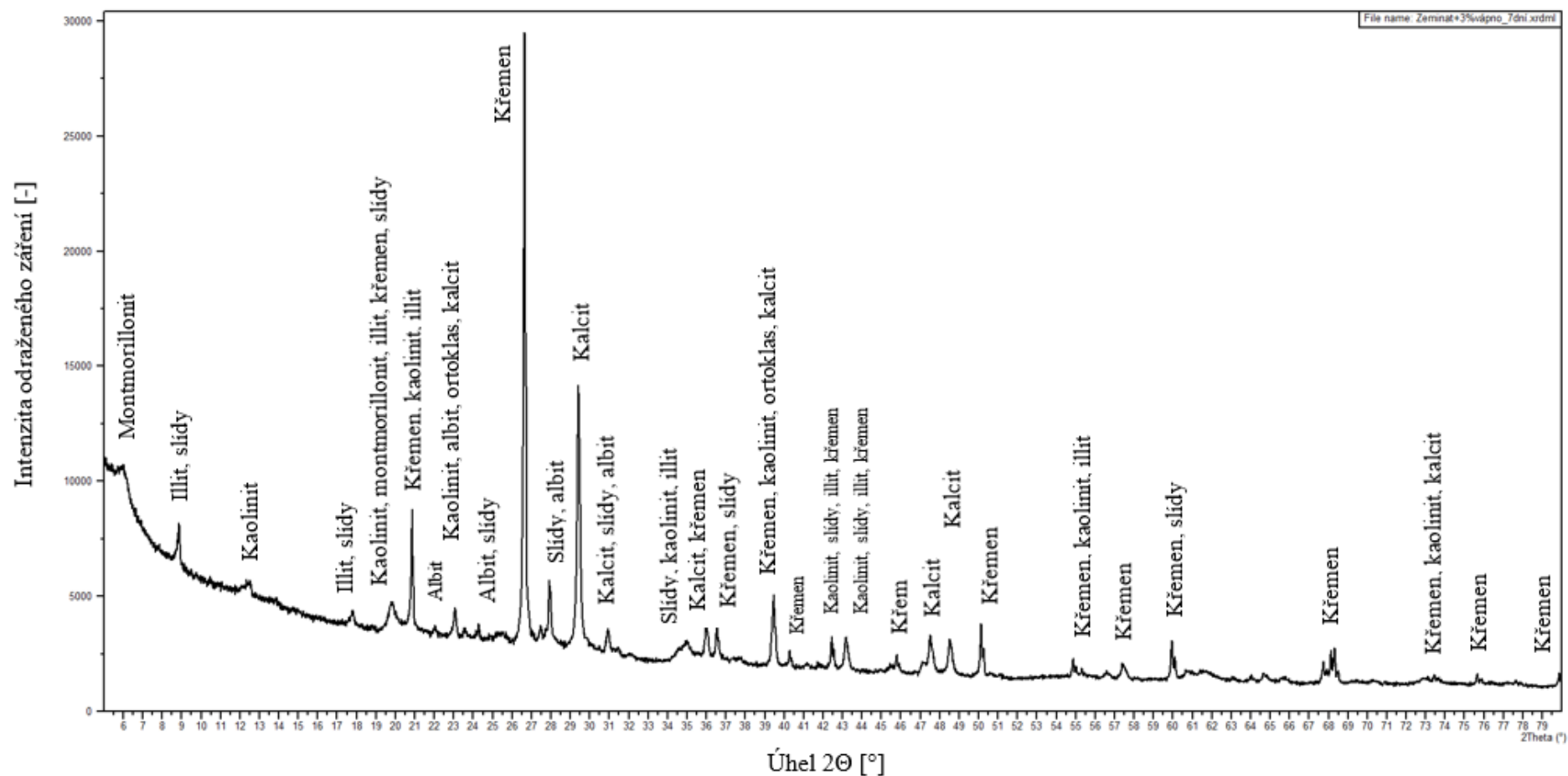
Příloha č. 7 Rentgenogram RTG difrakční analýzy samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl, 1,5 % vápna a 4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R



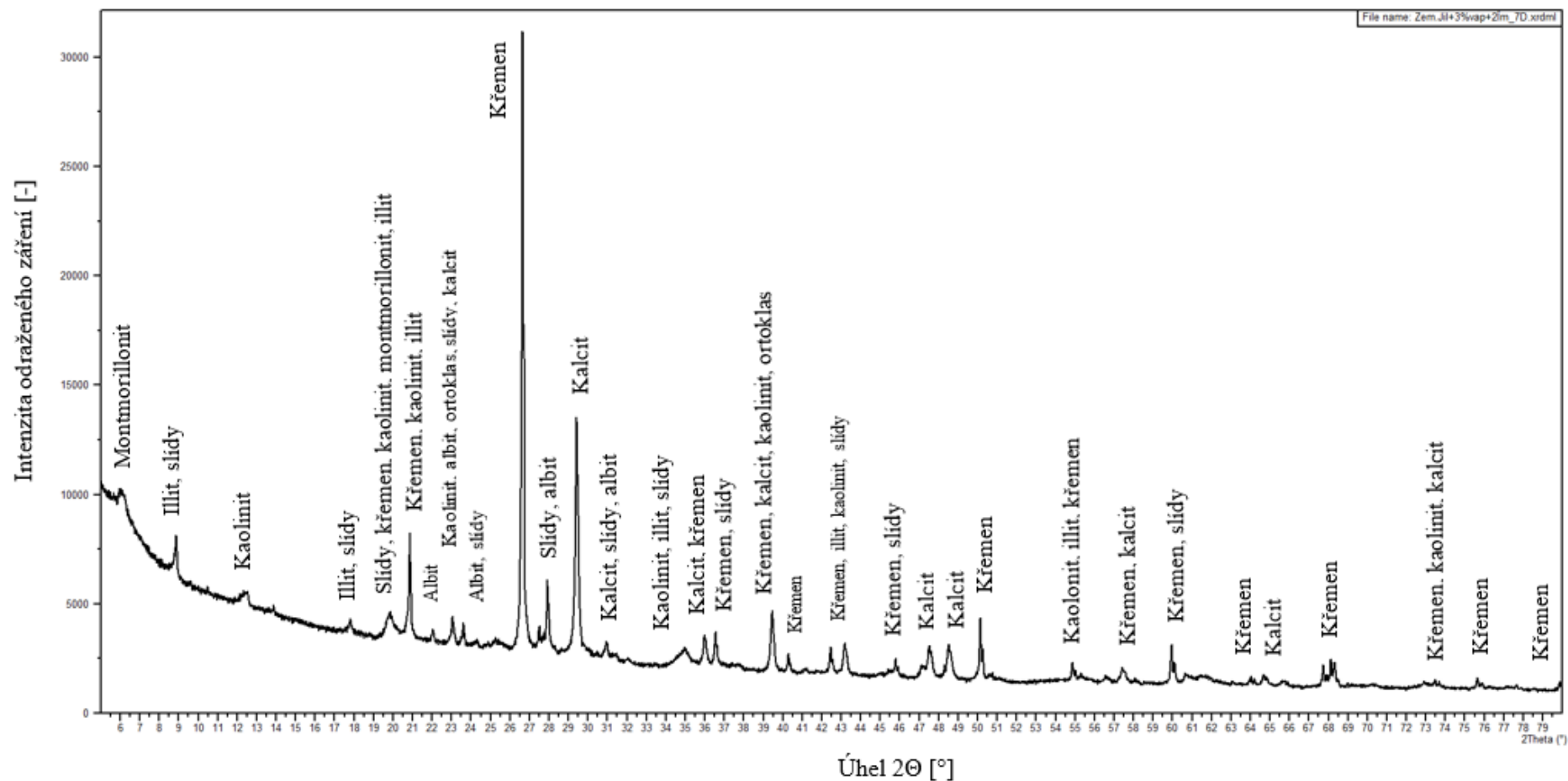
Příloha č. 8 Rentgenogram RTG difrakční analýzy samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl, 1,5 % vápna
a 8 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R



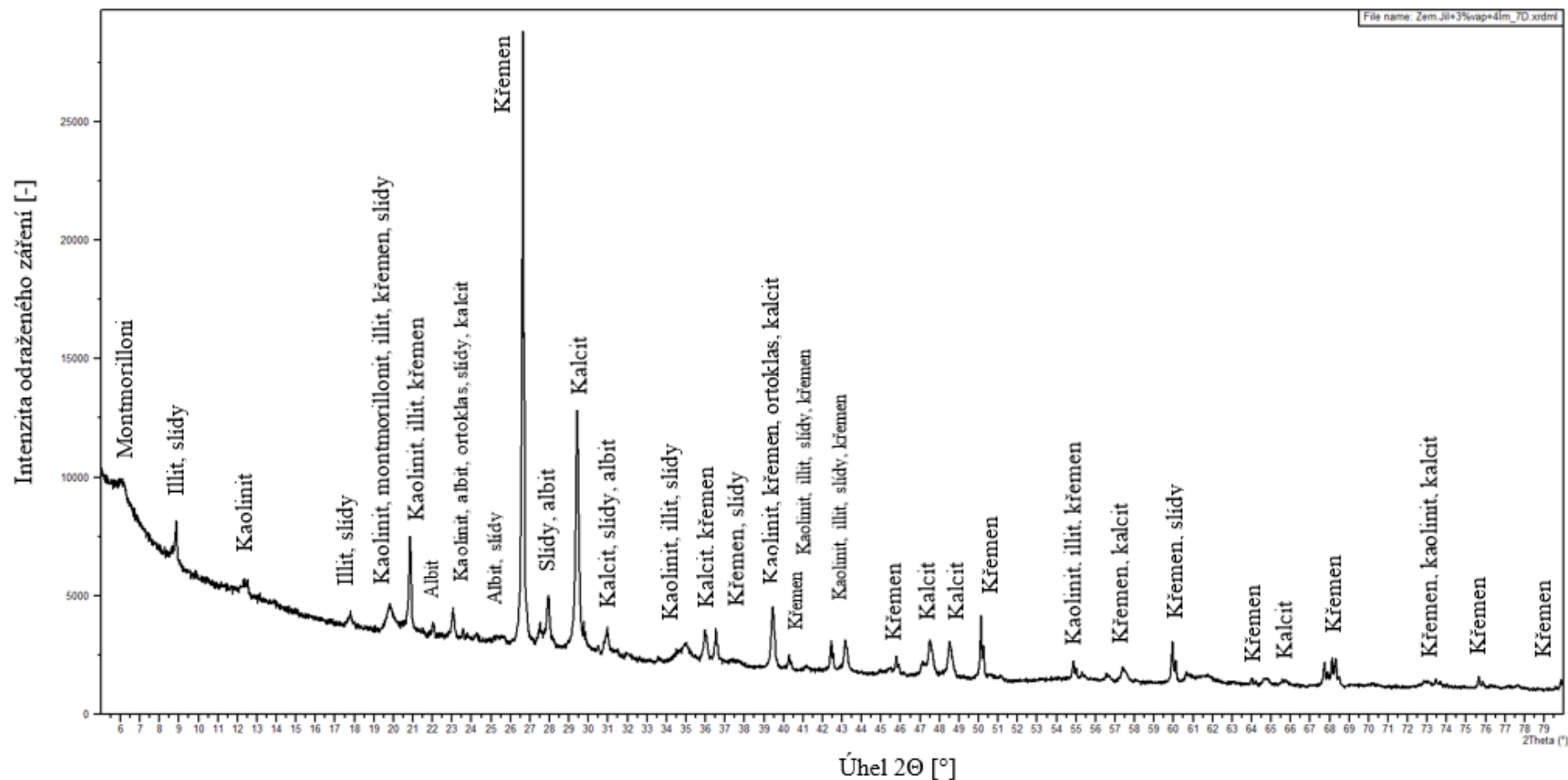
Příloha č. 9 Rentgenogram RTG difrakční analýzy samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl a 3,0 % vápna



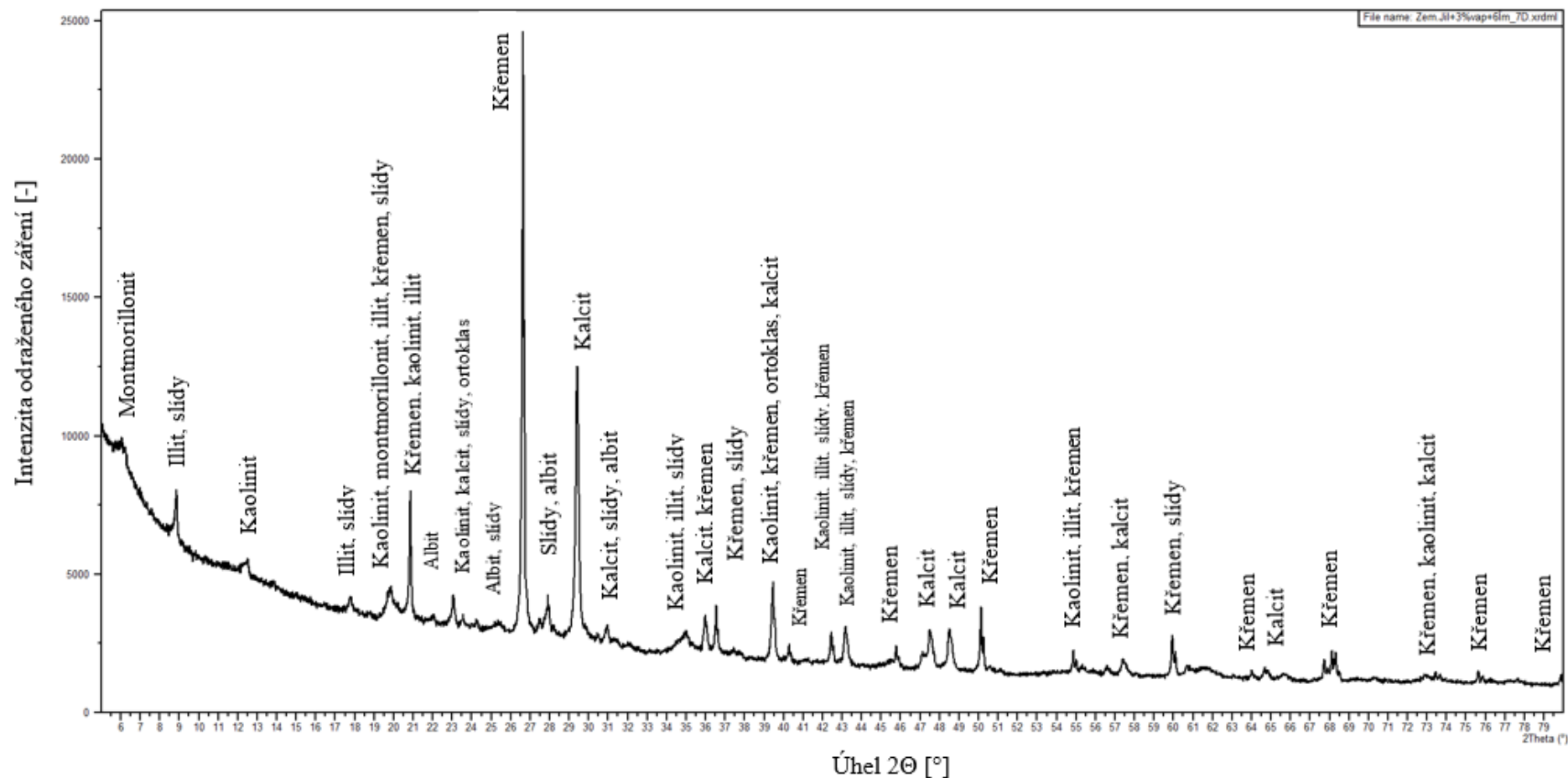
Příloha č. 10 Rentgenogram RTG difrakční analýzy samozhutnitelné záливky na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna a 2 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R



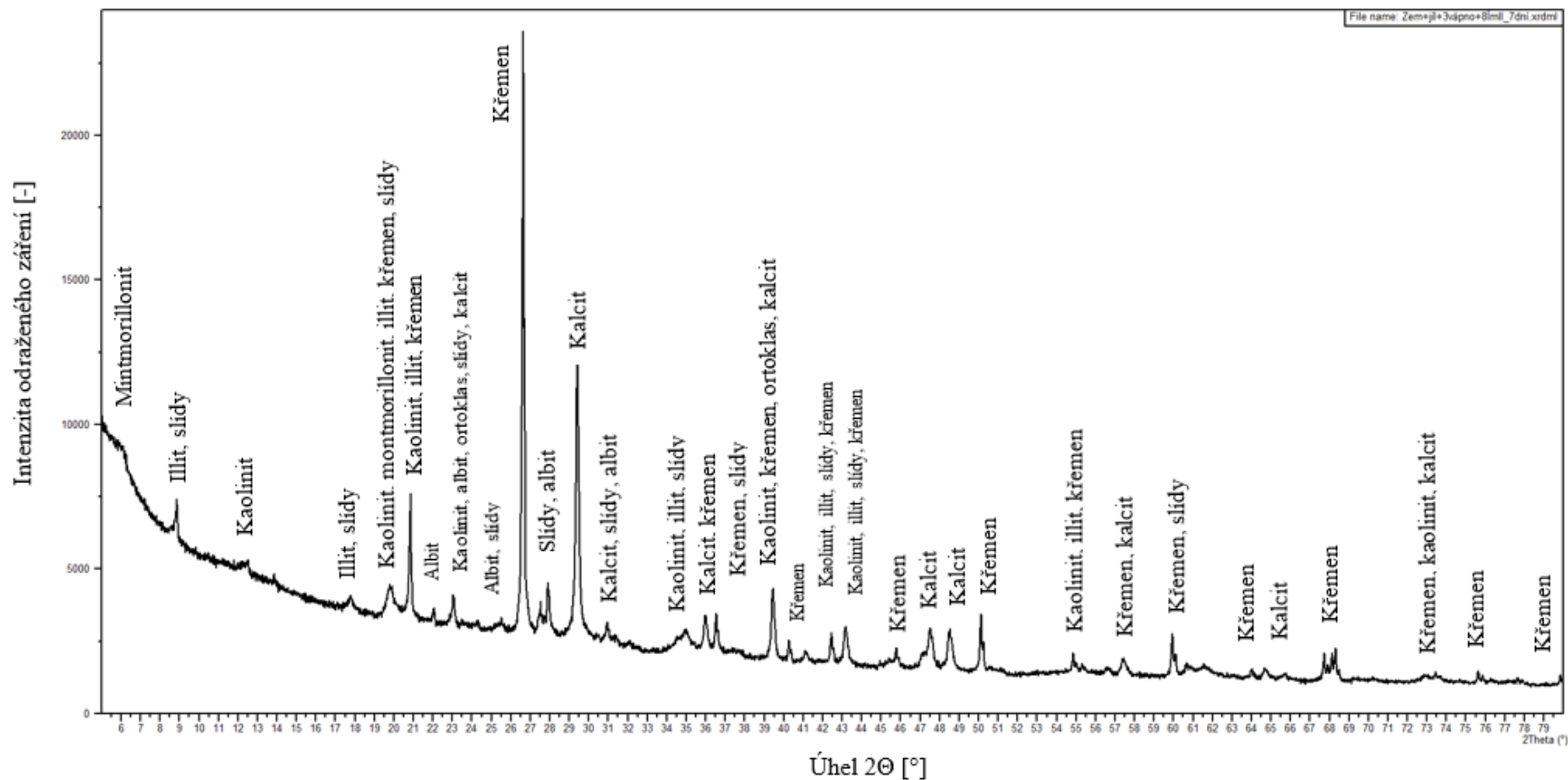
Příloha č. 11 Rentgenogram RTG difrakční analýzy samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna a 4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R



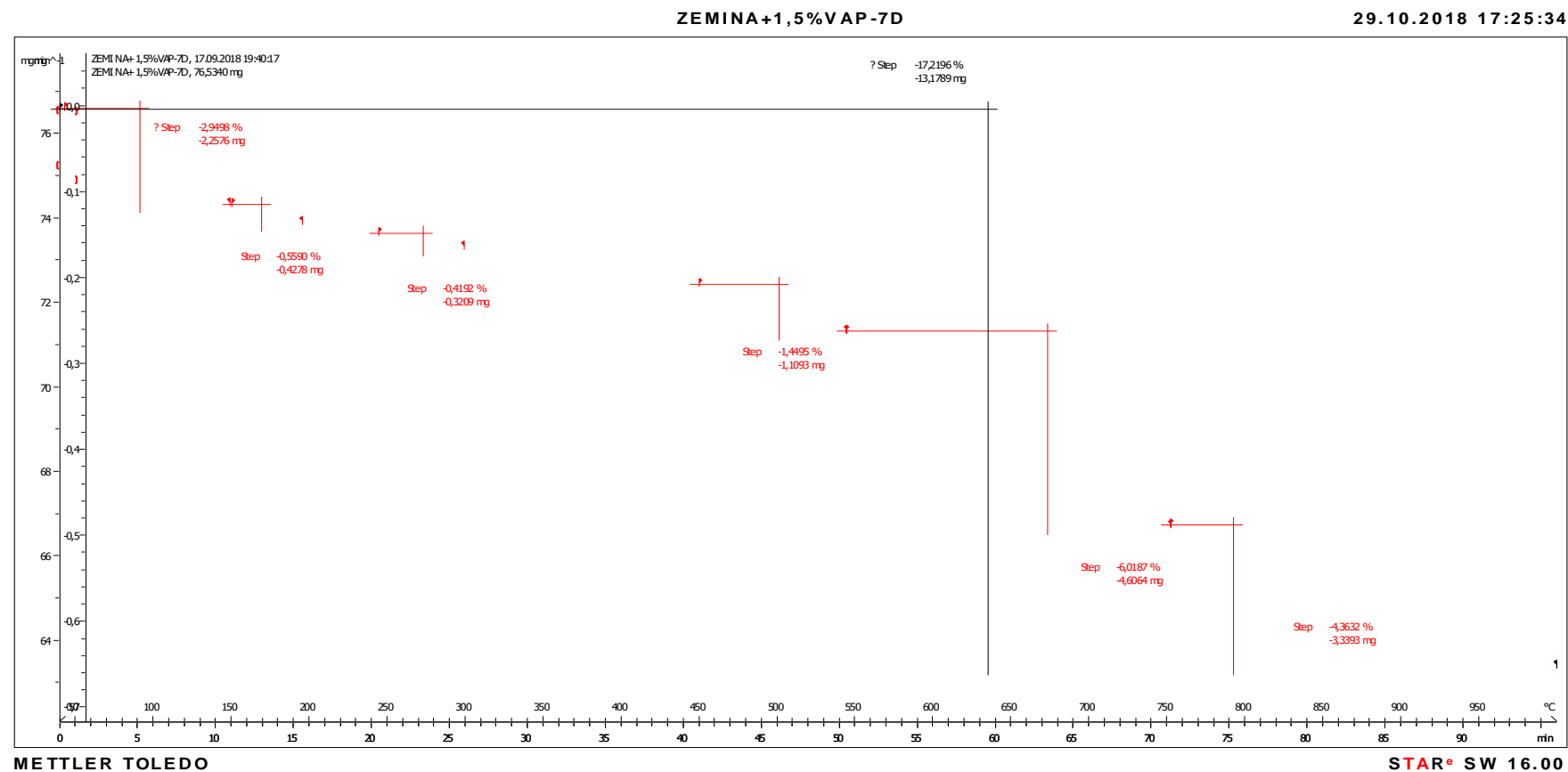
Příloha č. 12 Rentgenogram RTG difrakční analýzy samozhutnitelné záливky na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna a 6 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R



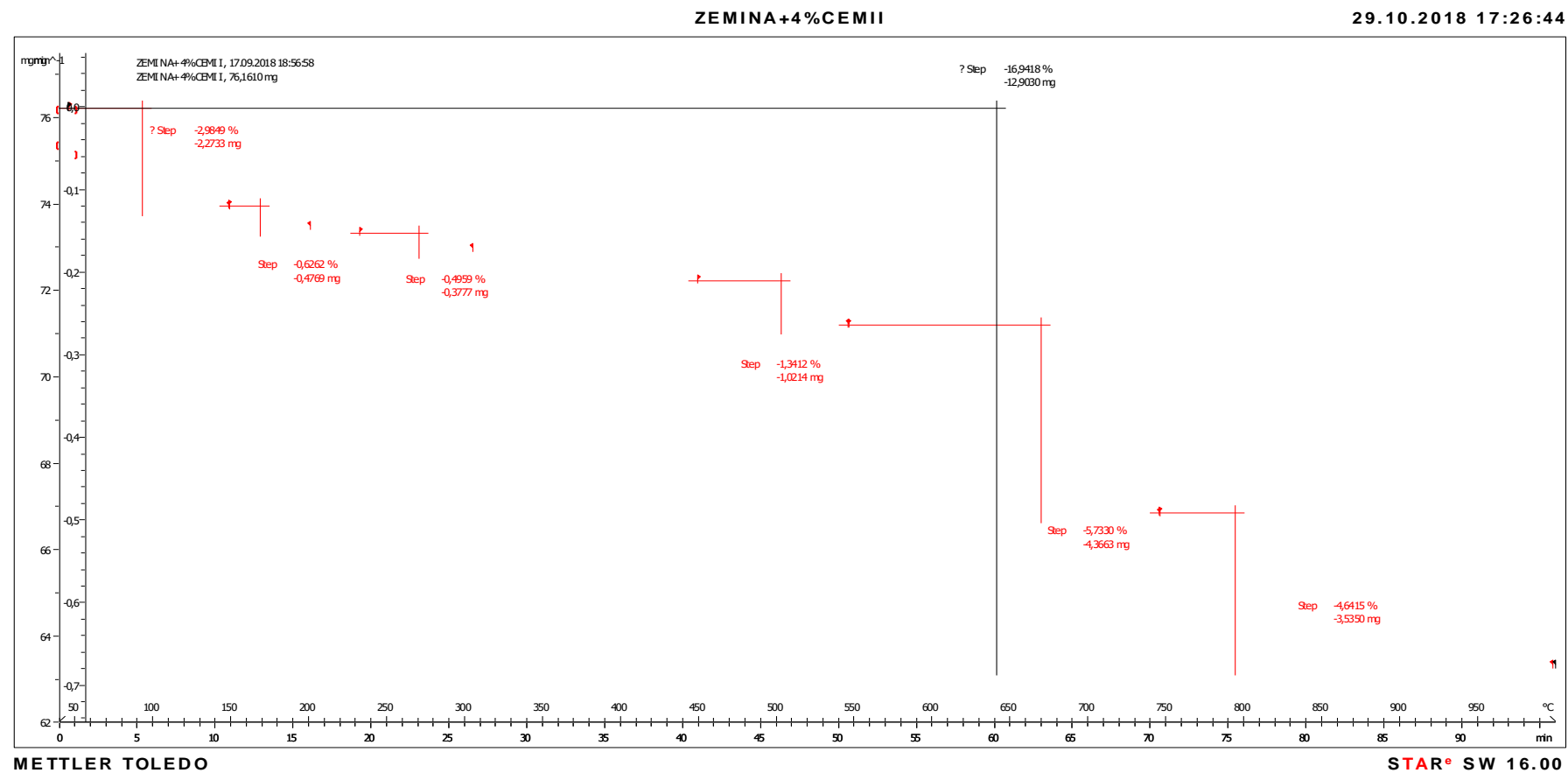
Příloha č. 13 Rentgenogram RTG difrakční analýzy samozhutnitelné zálevky na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna a 8 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R



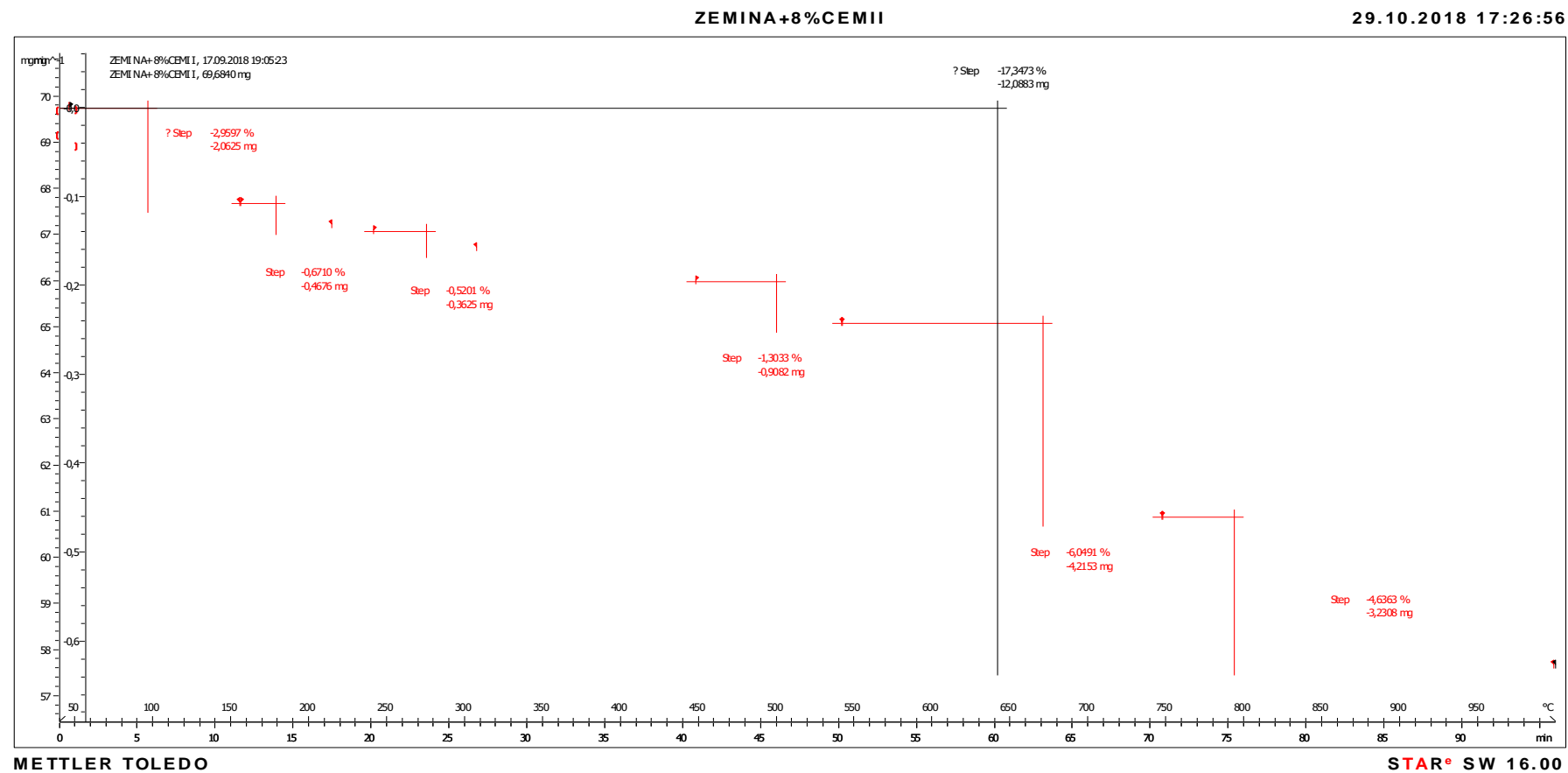
Příloha č. 14 DTA a TG křivky samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl a 1,5 % vápna



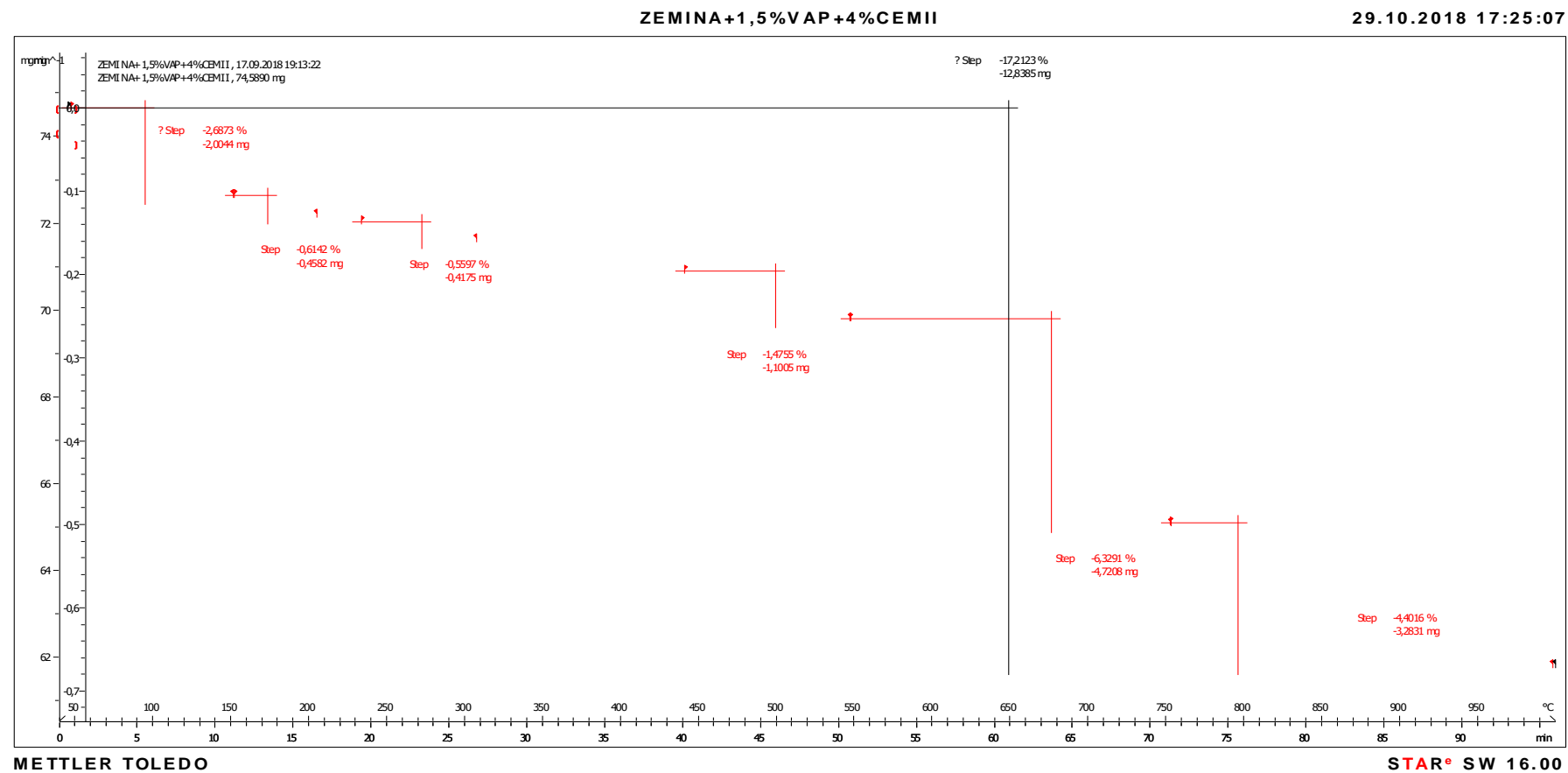
Příloha č. 15 DTA a TG křivky samozhutnitelné záливky na bázi jílu Cl a 4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R



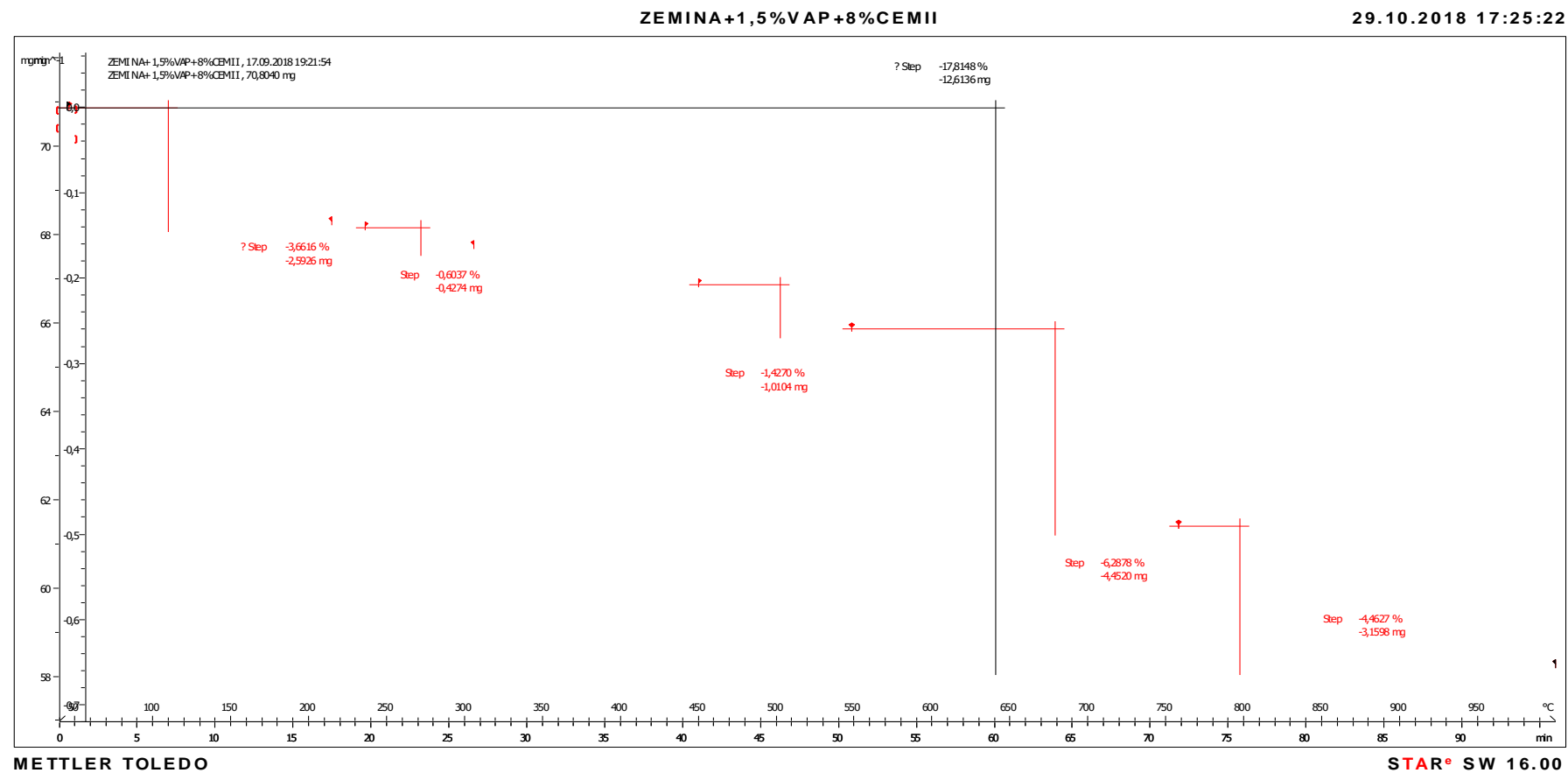
Příloha č. 16 DTA a TG křivky samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl a 8 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R



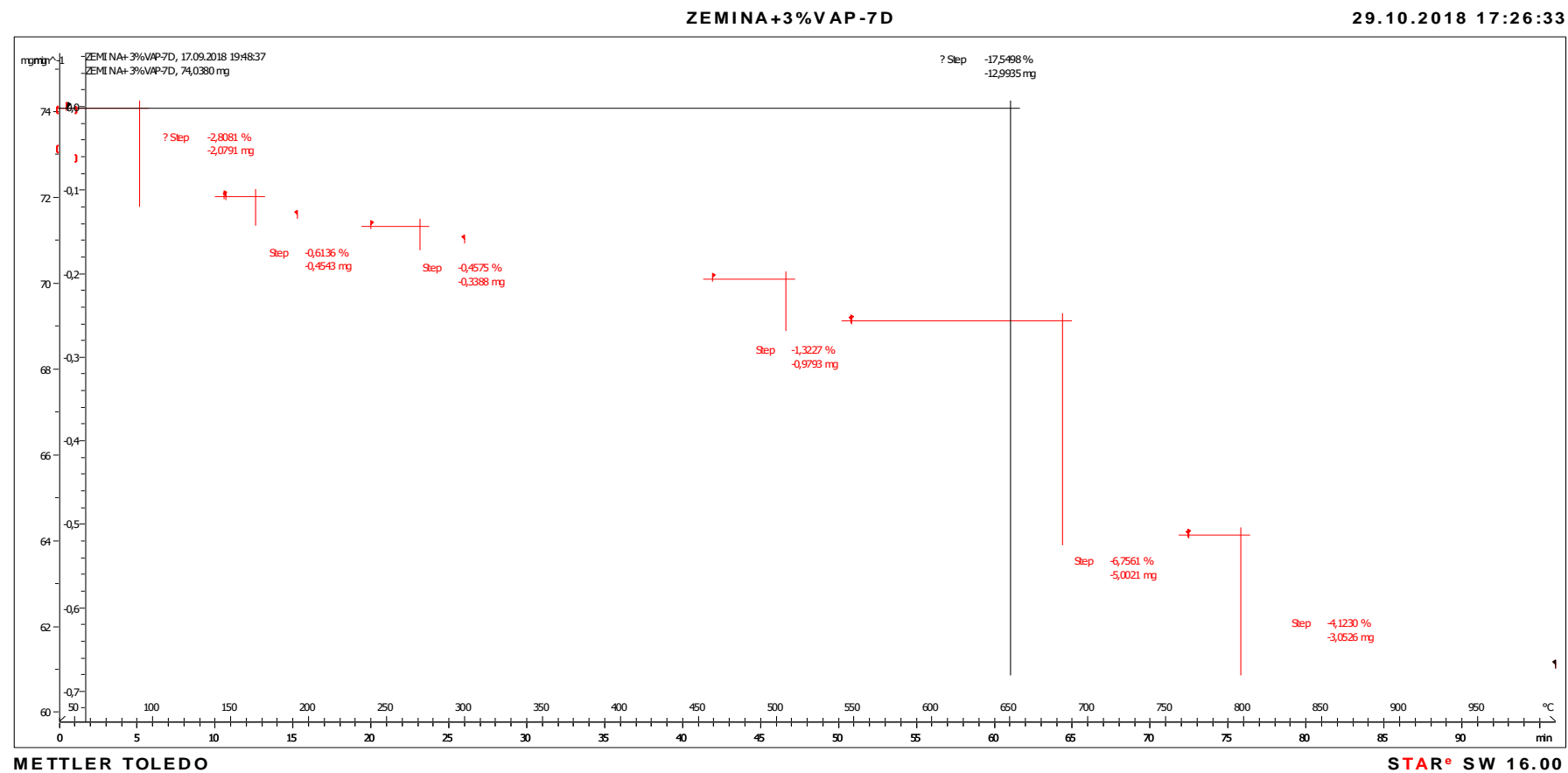
Příloha č. 17 DTA a TG křivky samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl, 1,5 % vápna
a 4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R



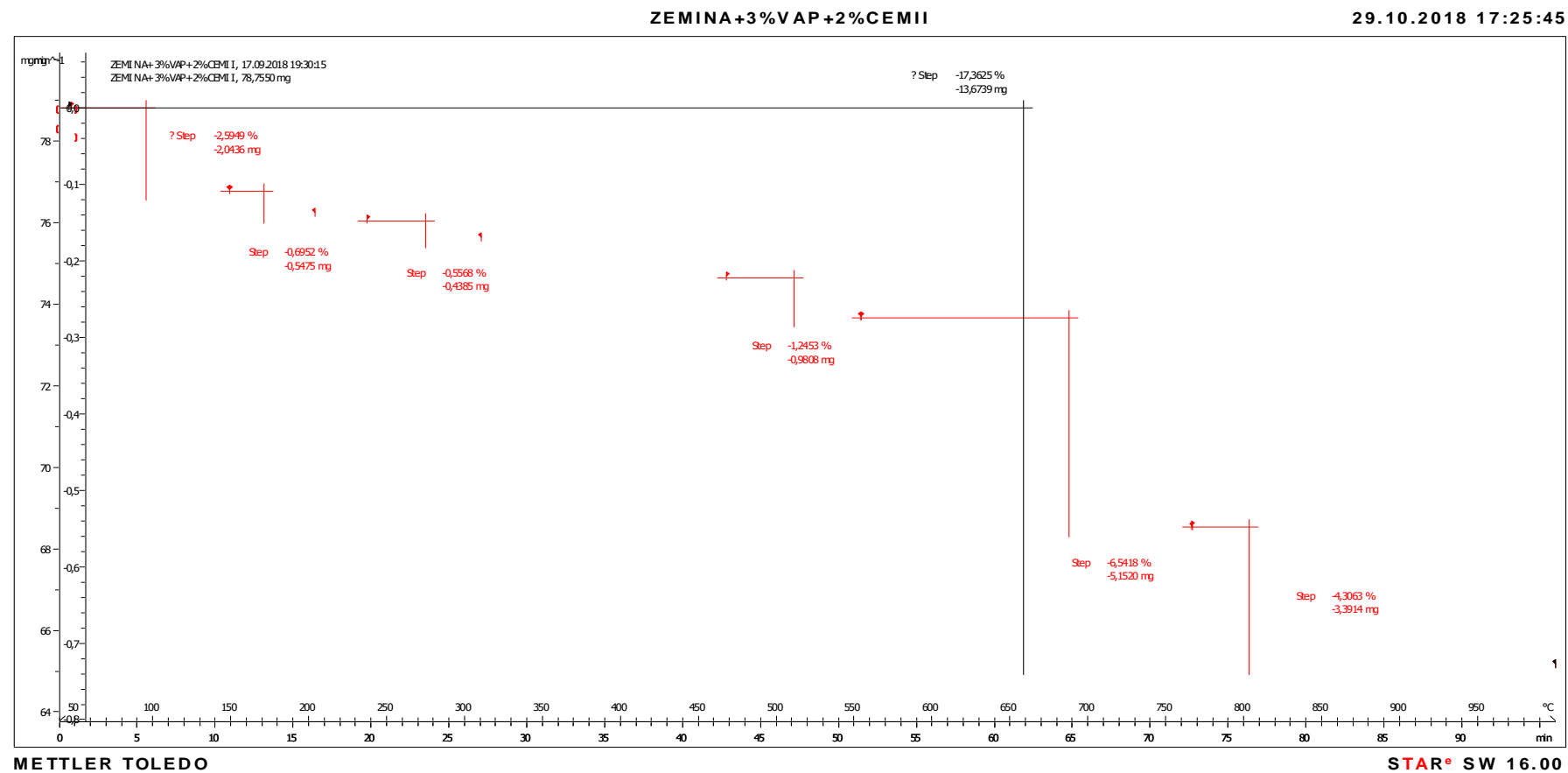
Příloha č. 18 DTA a TG křivky samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl, 1,5 % vápna
a 8 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R



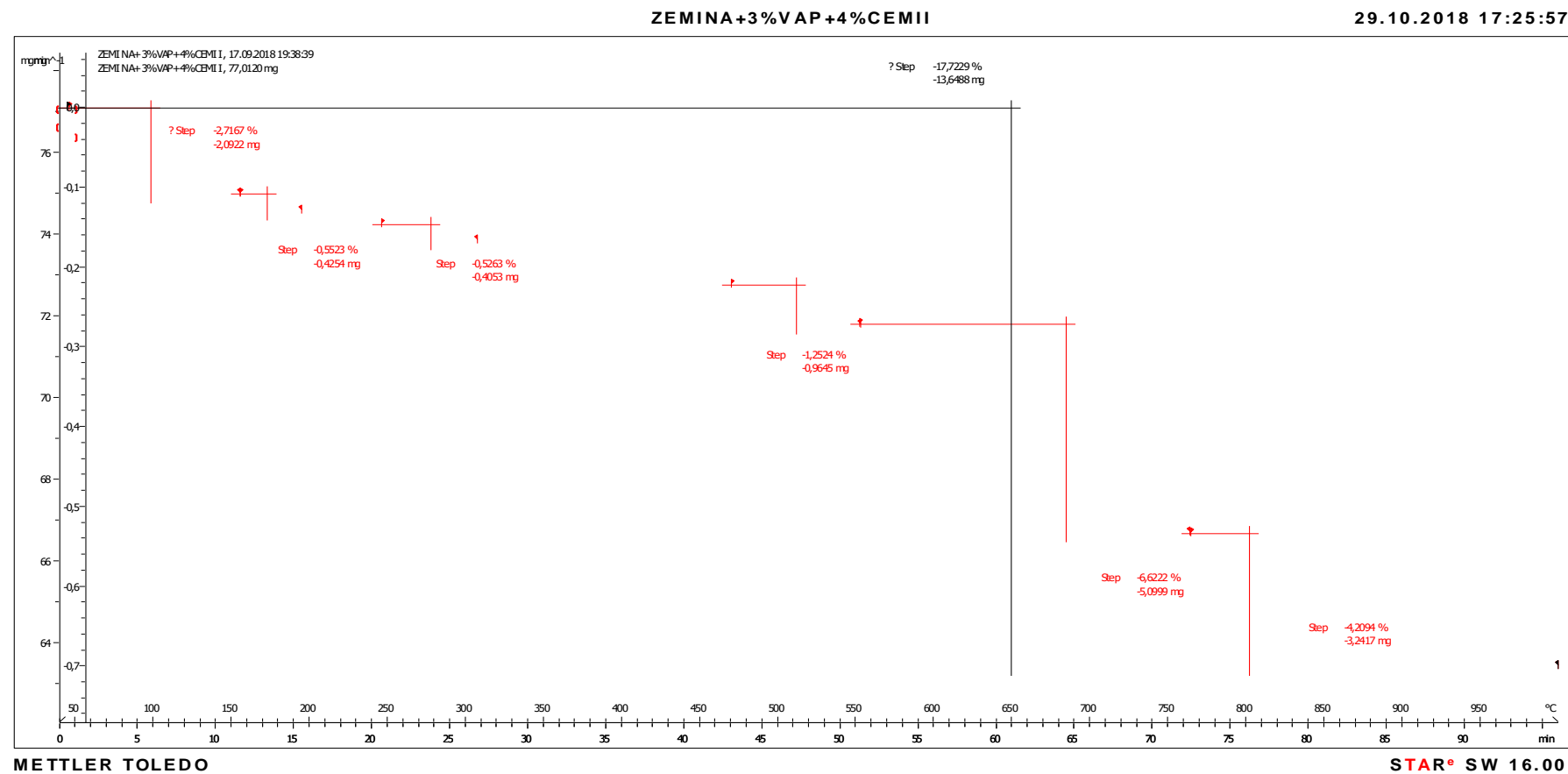
Příloha č. 19 DTA a TG křivky samozhutnitelné záливky na bázi jílu Cl a 3,0 % vápna



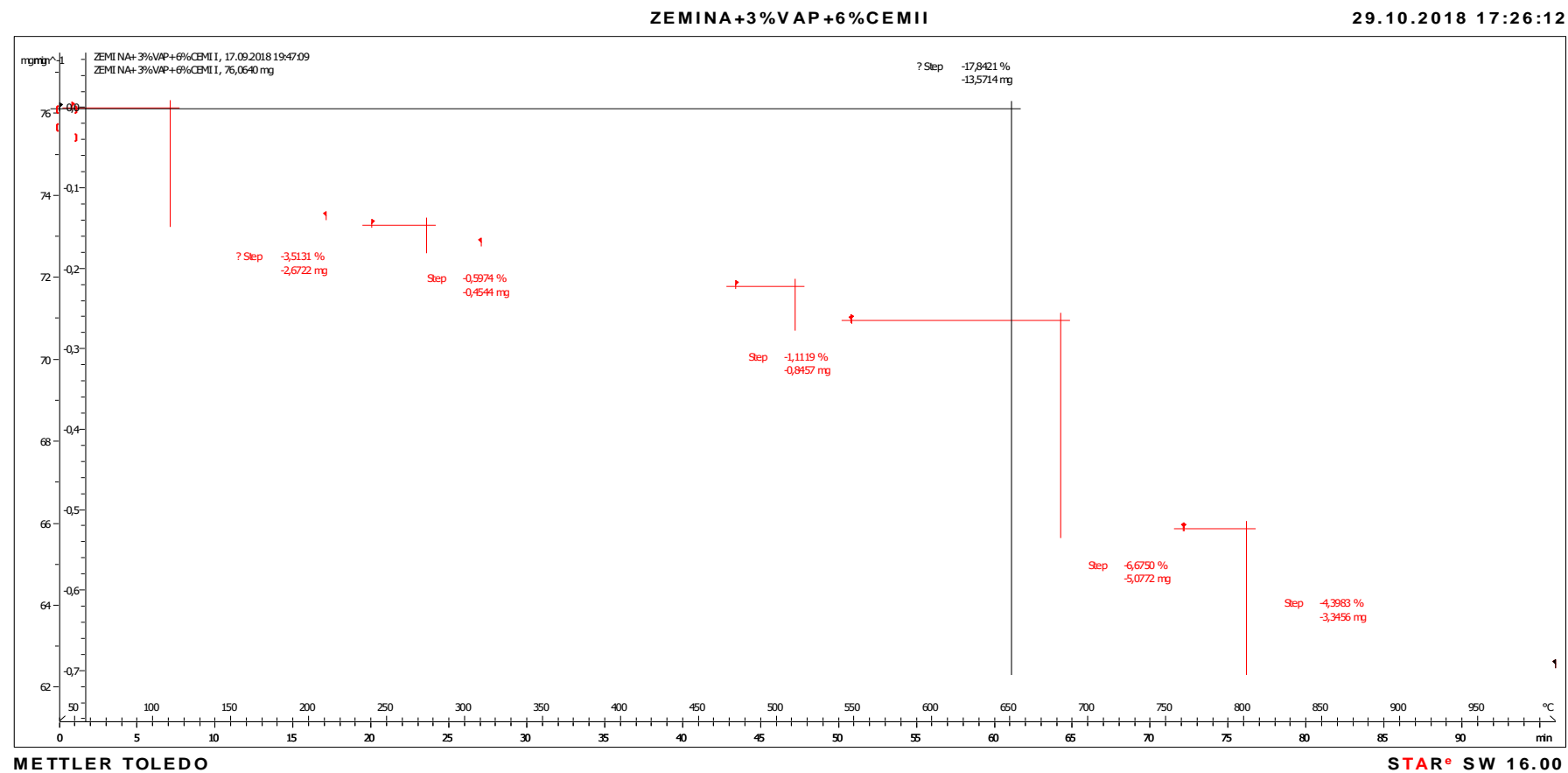
Příloha č. 20 DTA a TG křivky samozhutnitelné záливky na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna
a 2 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R



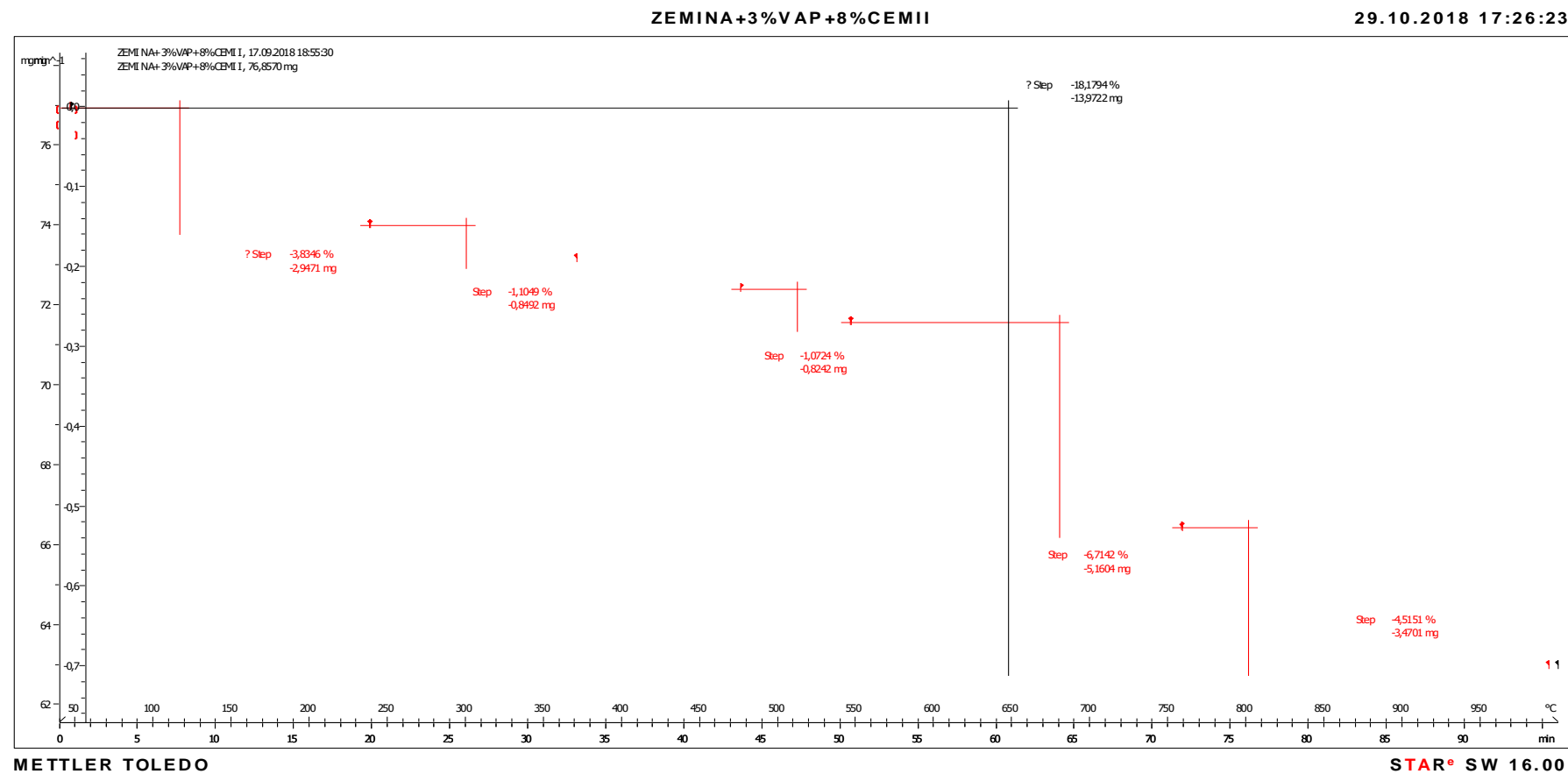
Příloha č. 21 DTA a TG křivky samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna
a 4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R

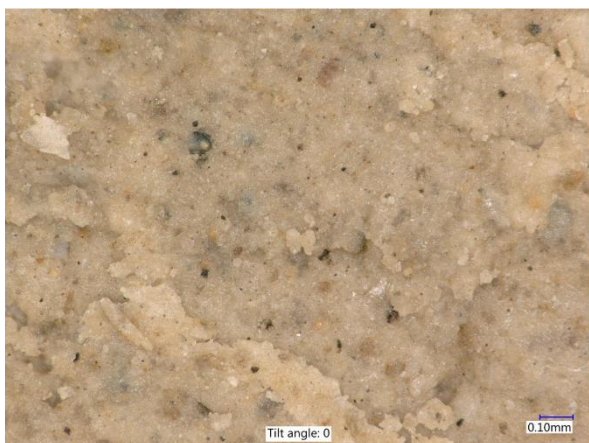


Příloha č. 22 DTA a TG křivky analýza samozhutnitelné zálivky na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna
a 6 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R

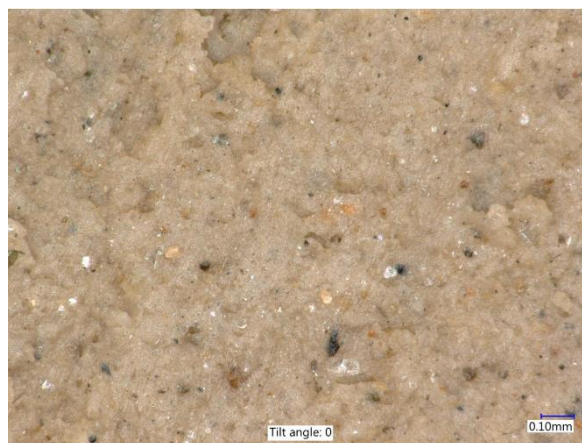


Příloha č. 23 DTA a TG křivky samozhutnitelné záливky na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna
a 8 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R

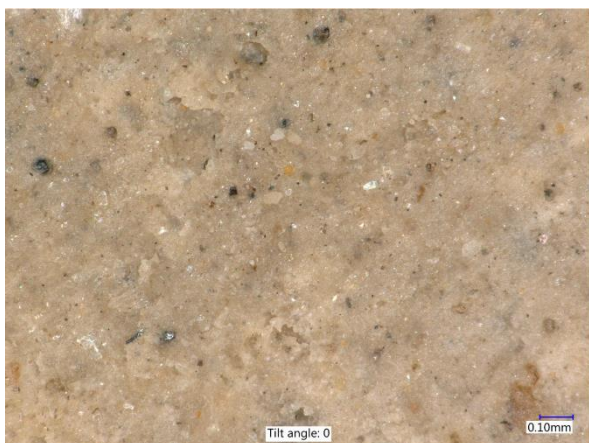


Příloha č. 24 Optická mikroskopie vybraných samozhutnitelných zálivek

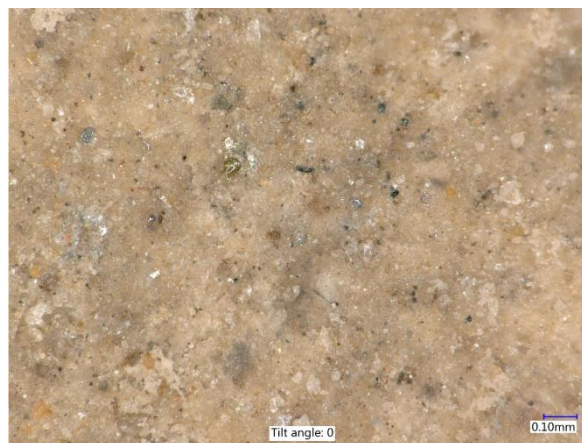
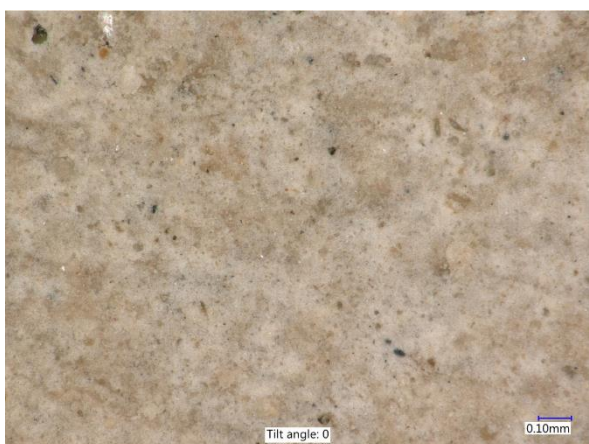
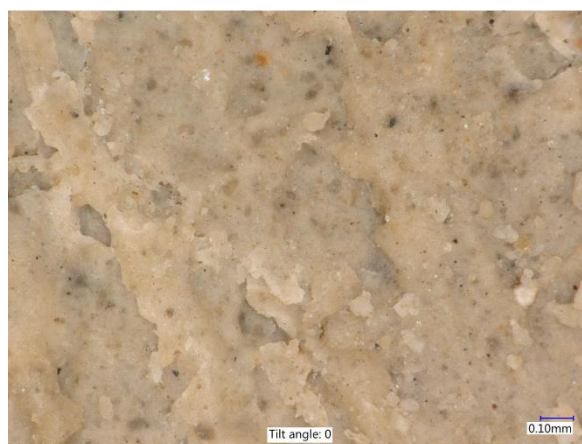
a) Jíl Cl, 1,5 % vápna



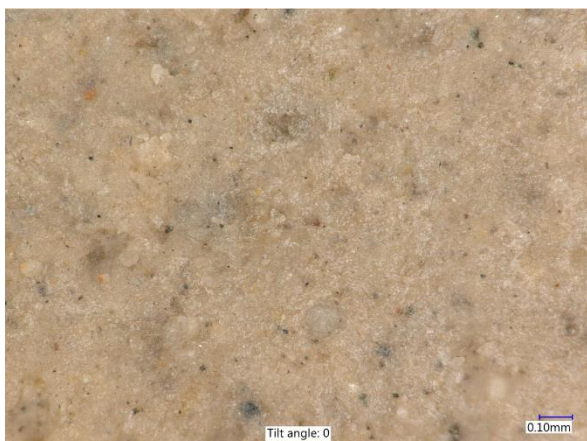
b) Jíl Cl, 4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R



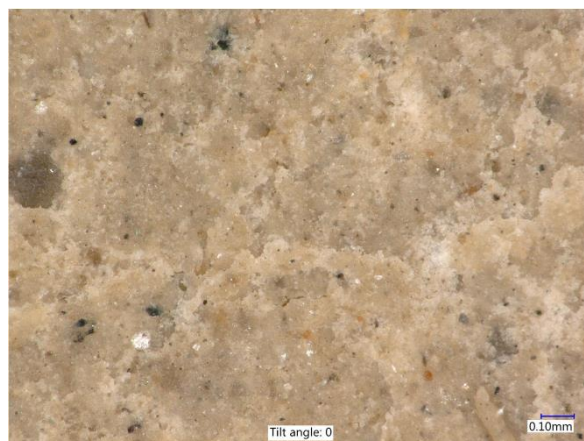
c) Jíl Cl, 8 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R

d) Jíl Cl, 1,5 % vápna,
4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 Re) Jíl Cl, 1,5 % vápna,
8 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R

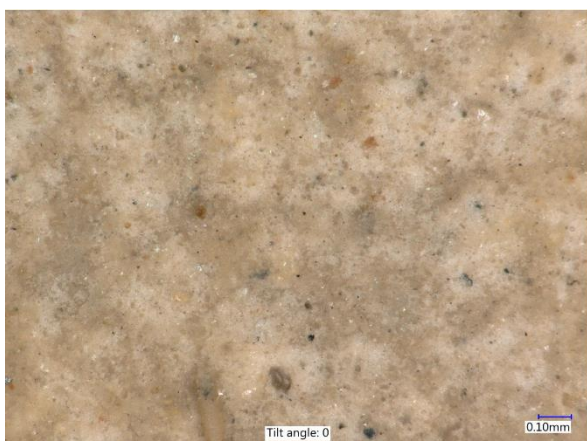
f) Jíl Cl, 3,0 % vápna



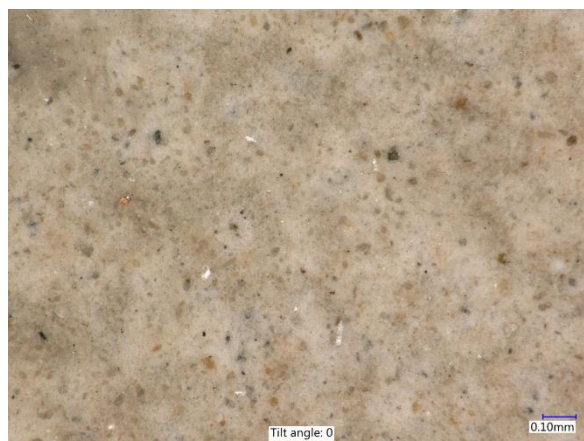
g) Jíl Cl, 3,0 % vápna,
2 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R



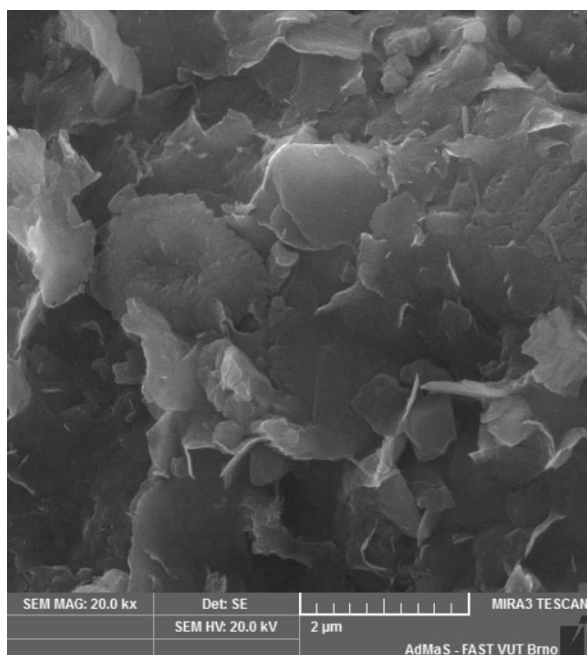
h) Jíl Cl, 3,0 % vápna,
4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R



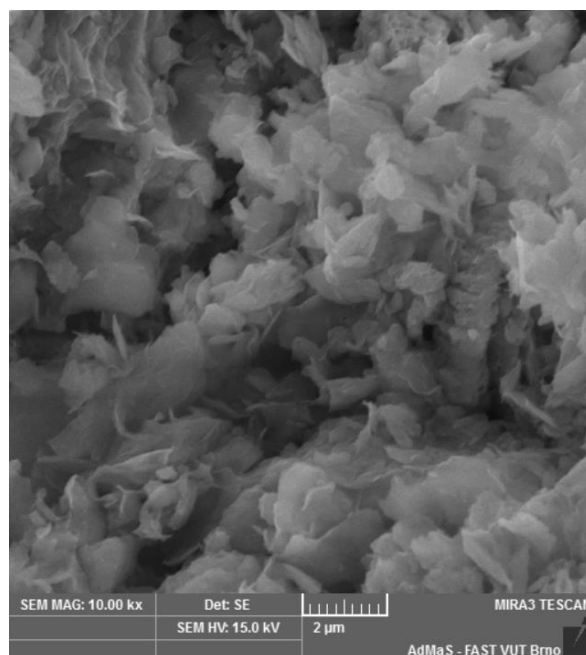
i) Jíl Cl, 3,0 % vápna,
6 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R



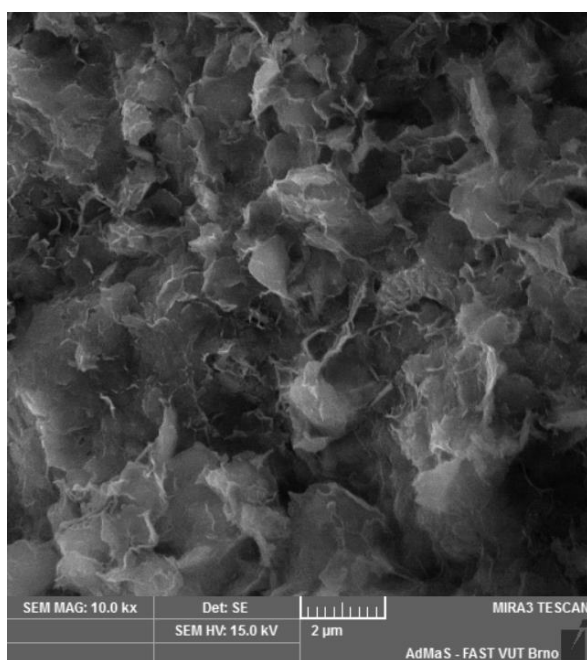
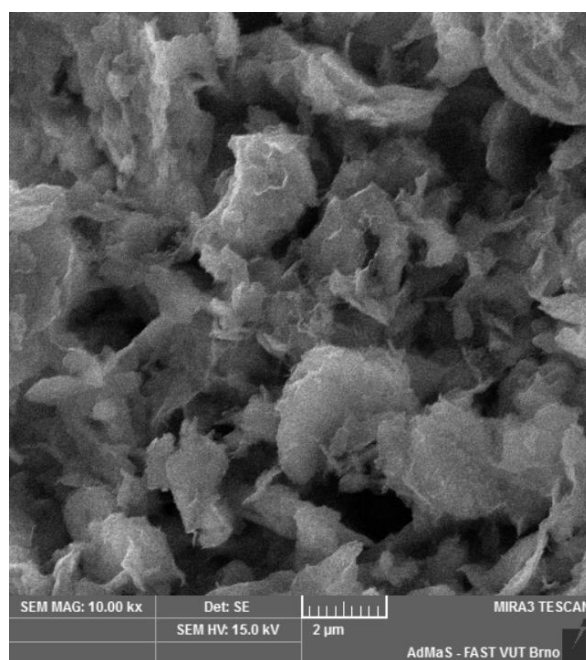
j) Jíl Cl, 3,0 % vápna,
8 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R

Příloha č. 25 Rastrovací elektronová mikroskopie vybraných samozhutnitelných zálivek

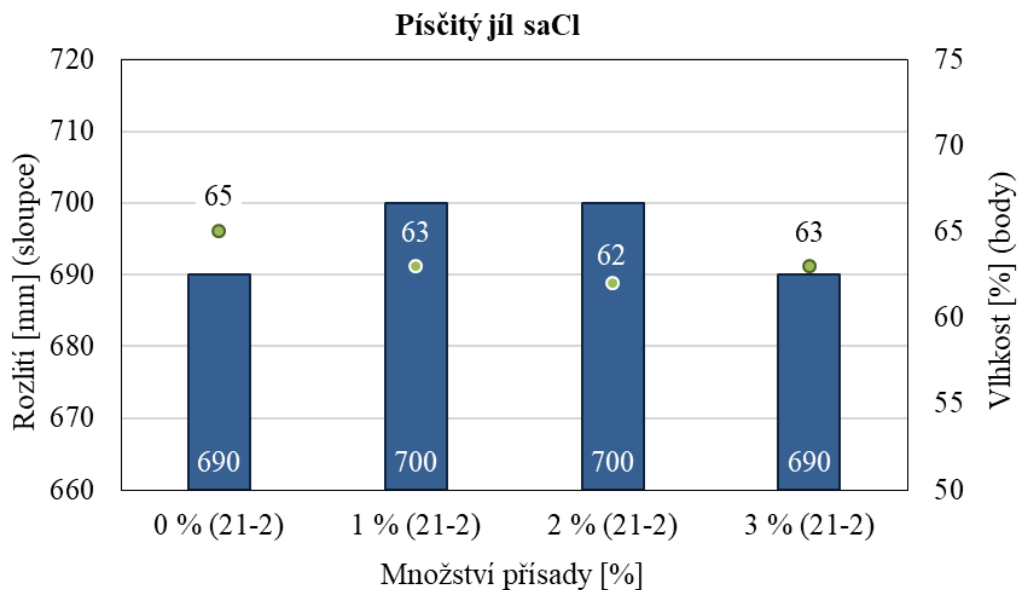
a) Jíl Cl



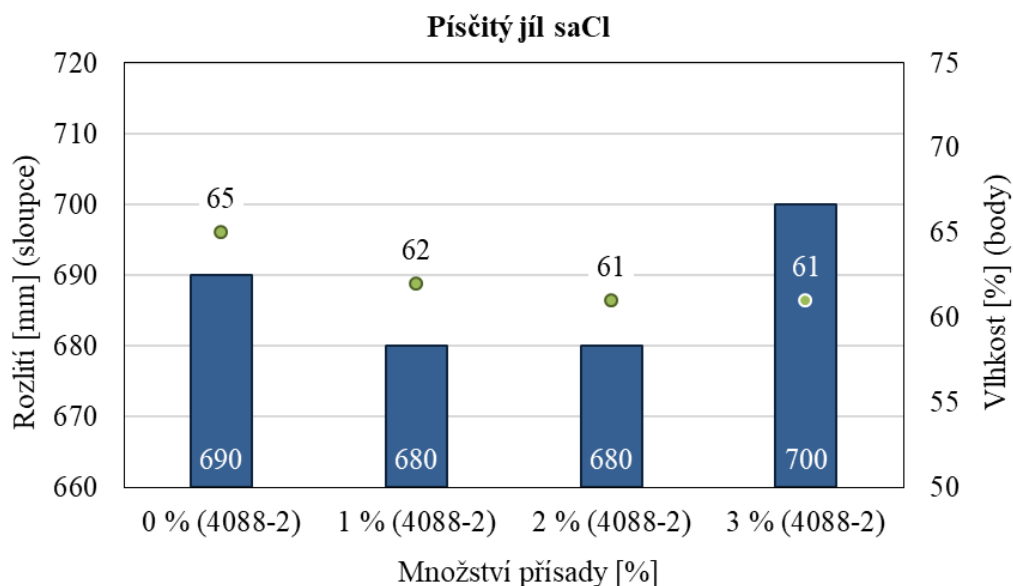
b) Jíl Cl a 1,5 % vápna

c) Jíl Cl, 1,5 % vápna,
4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 Rd) Jíl Cl, 3,0 % vápna,
4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R

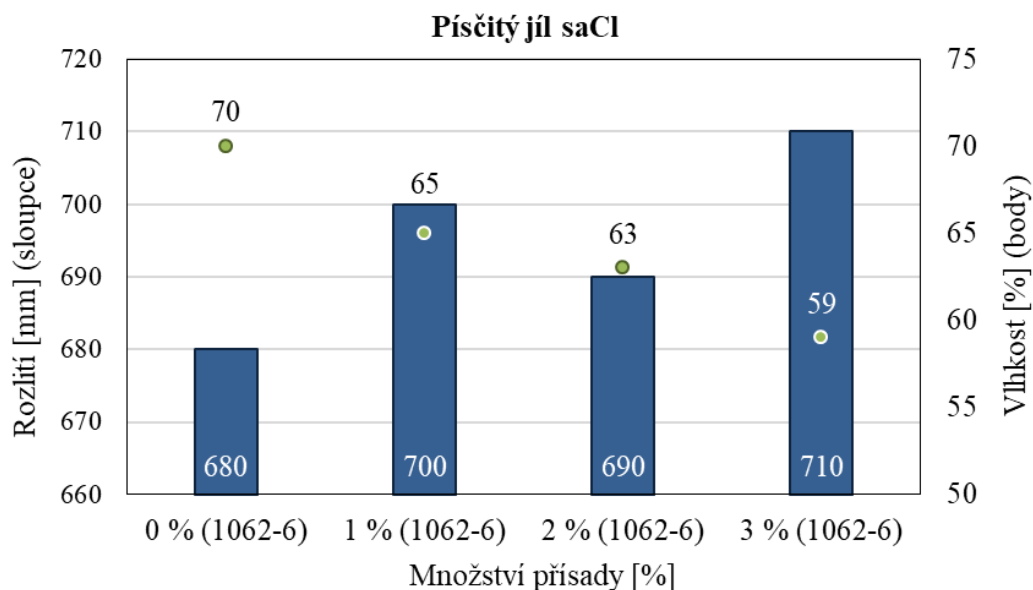
Příloha č. 26 a) Závislost rozlité na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 % cementu a 0-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 21



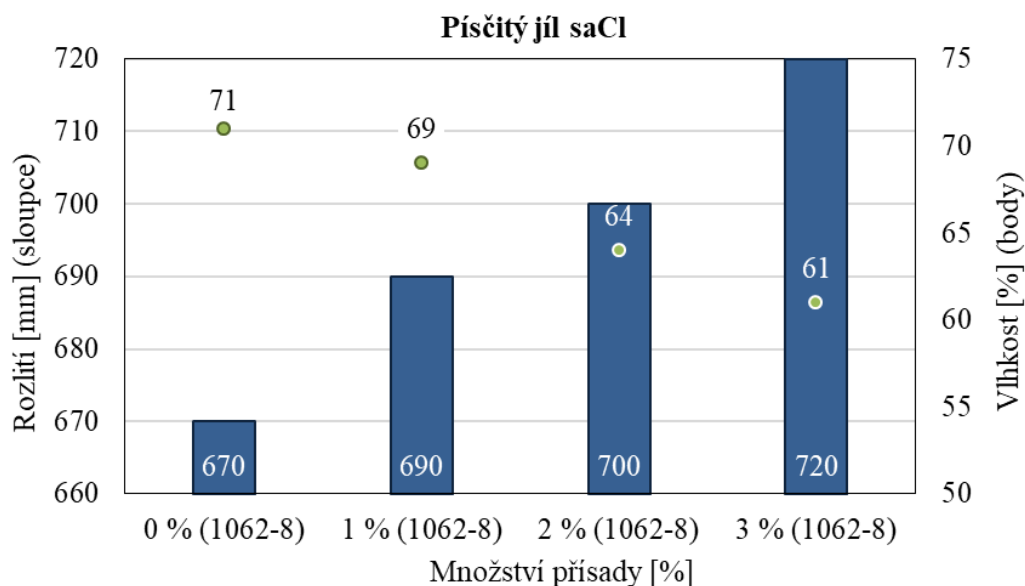
Příloha č. 26 b) Závislost rozlité na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 % cementu a 0-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 4088



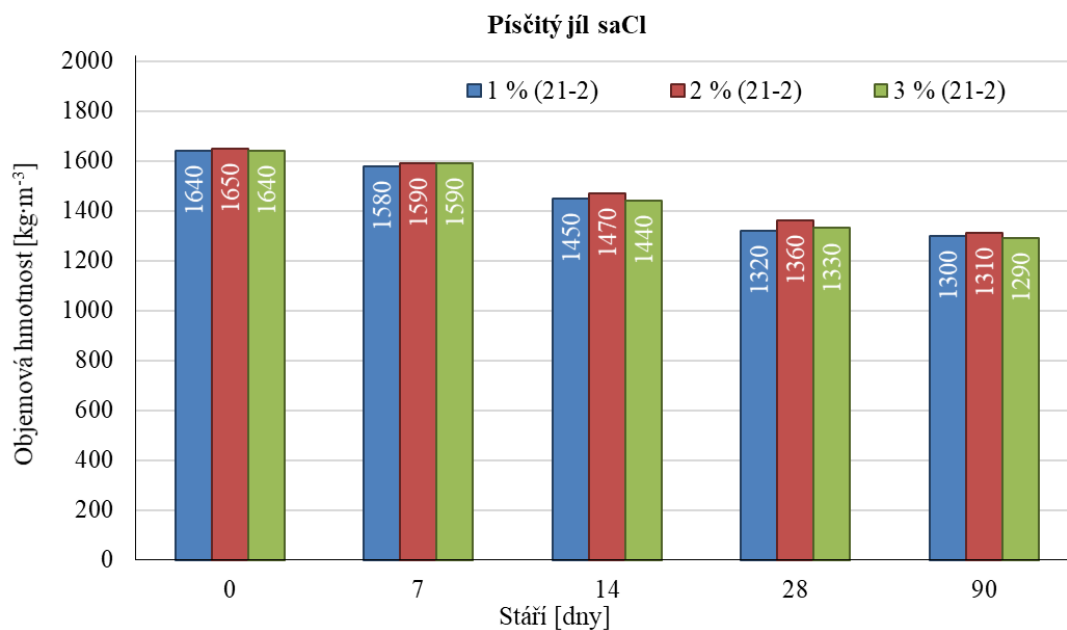
Příloha č. 26 c) Závislost rozlití na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 6 % cementu a 0-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



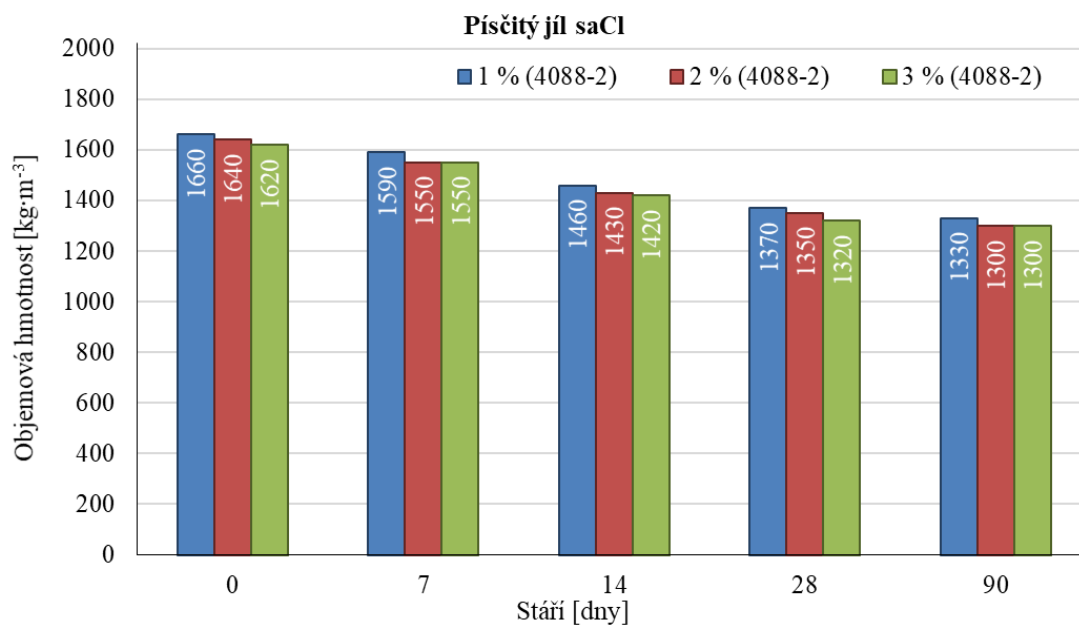
Příloha č. 26 d) Závislost rozlití na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 8 % cementu a 0-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



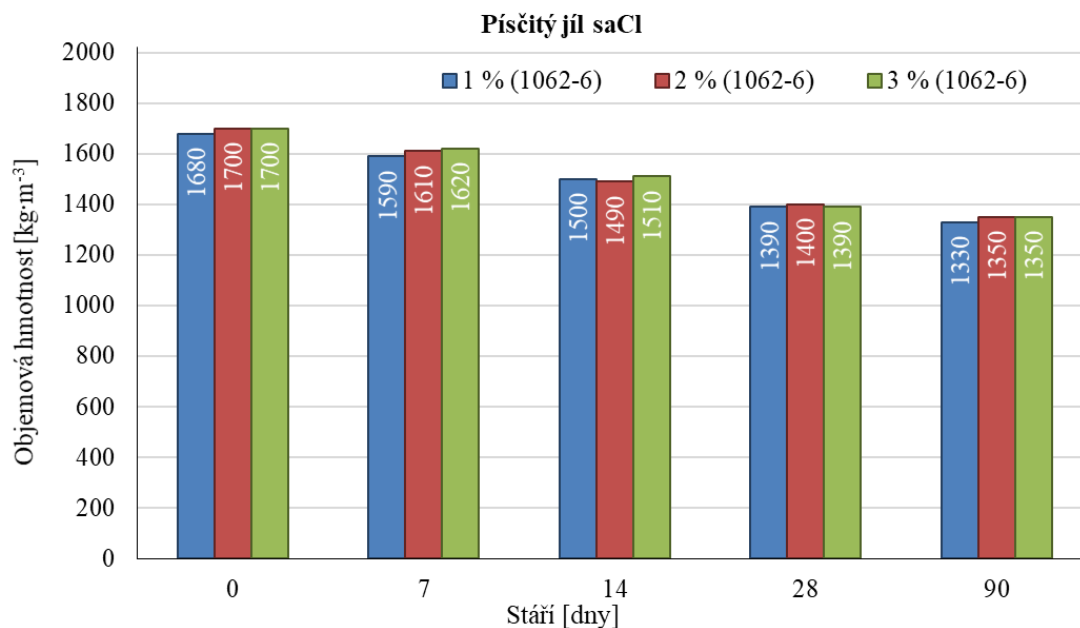
Příloha č. 26 e) Objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 21



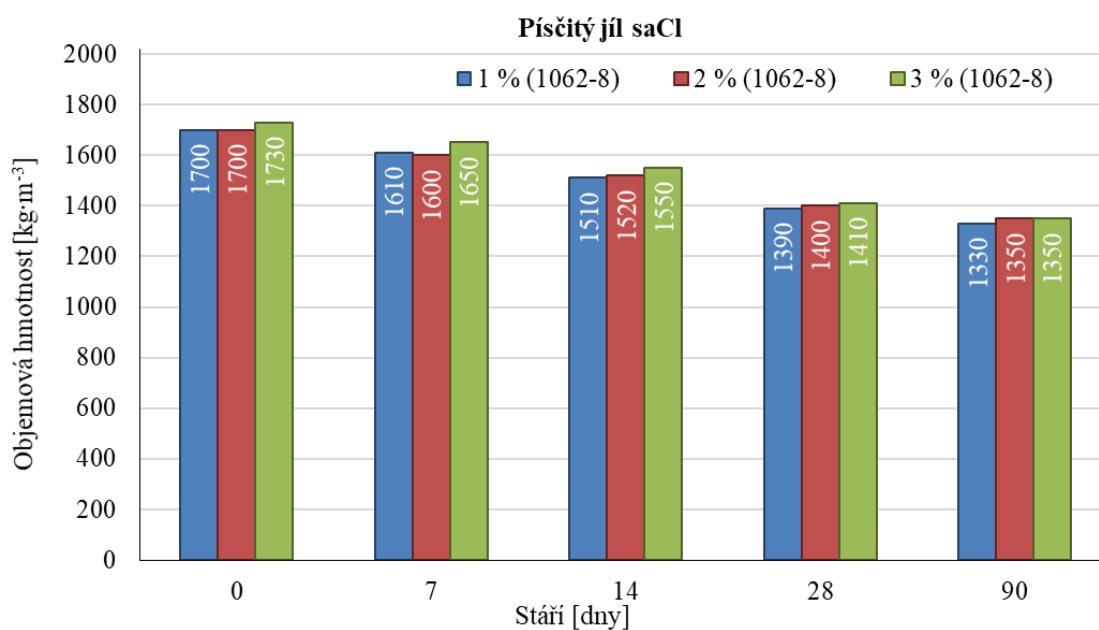
Příloha č. 26 f) Objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 4088



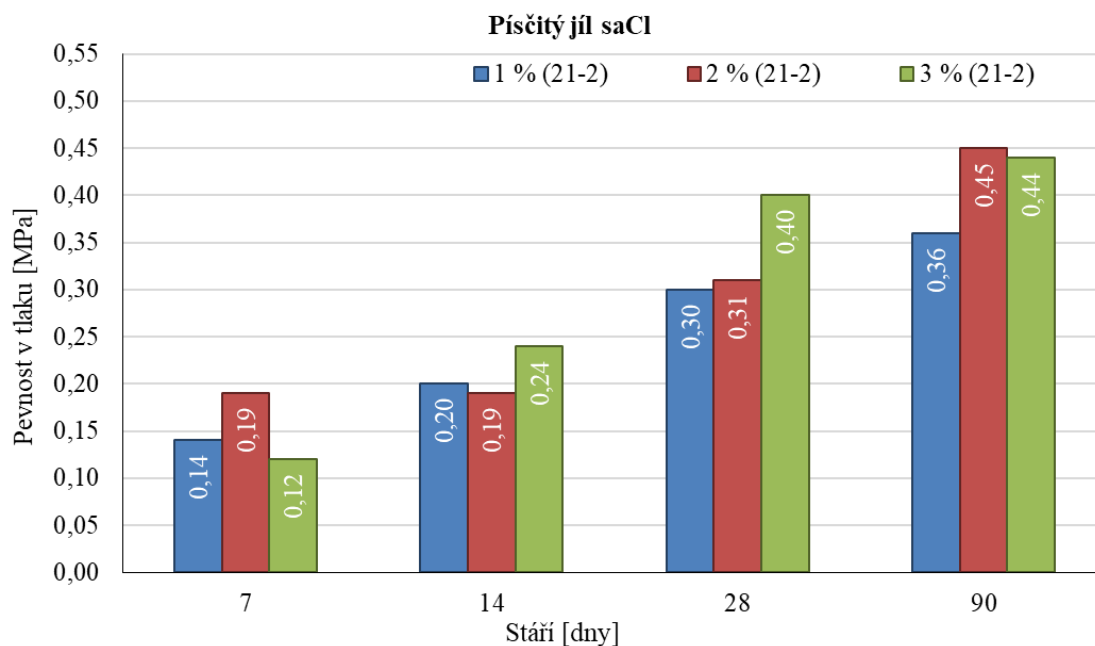
Příloha č. 26 g) Objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 6 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



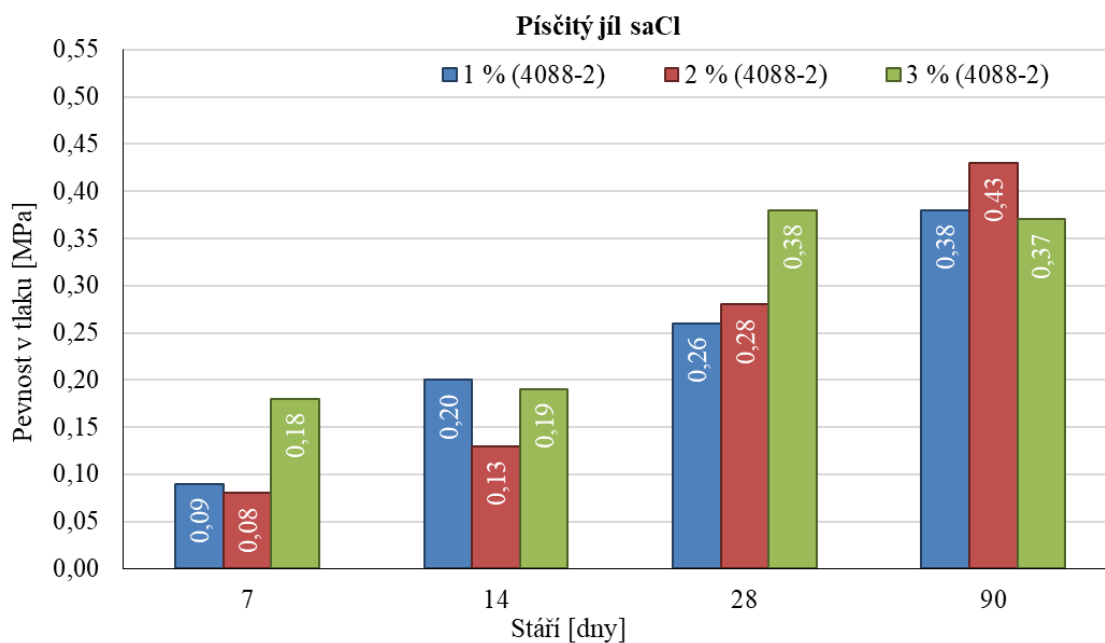
Příloha č. 26 h) Objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 8 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



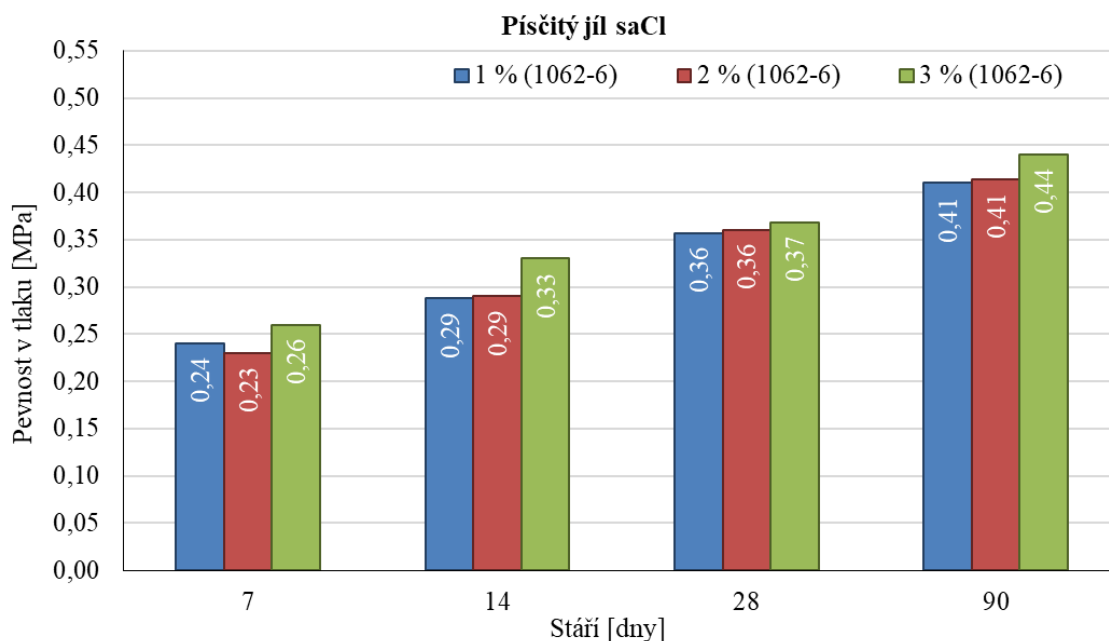
Příloha č. 26 i) Pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 21



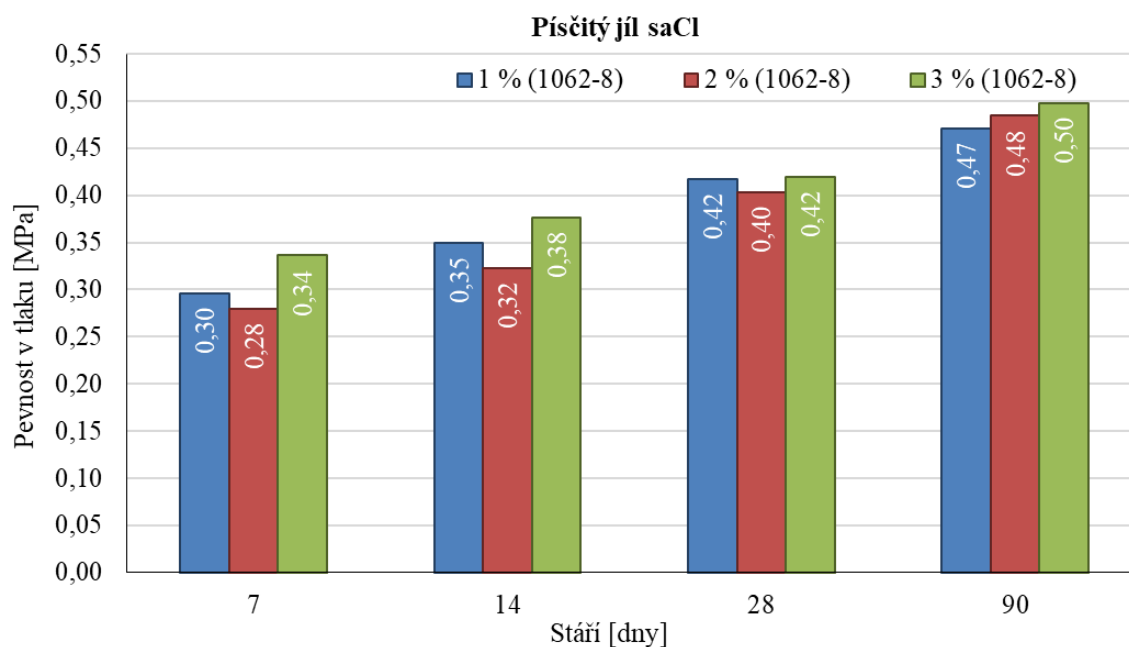
Příloha č. 26 j) Pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 4088



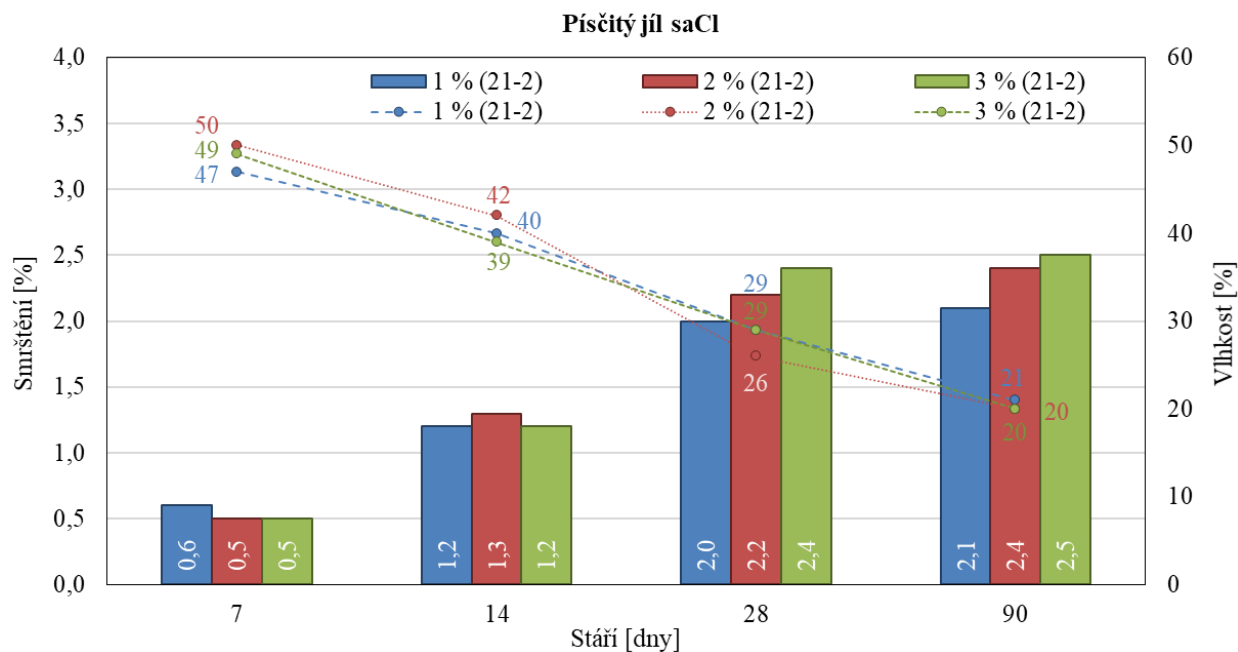
Příloha č. 26 k) Pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 6 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



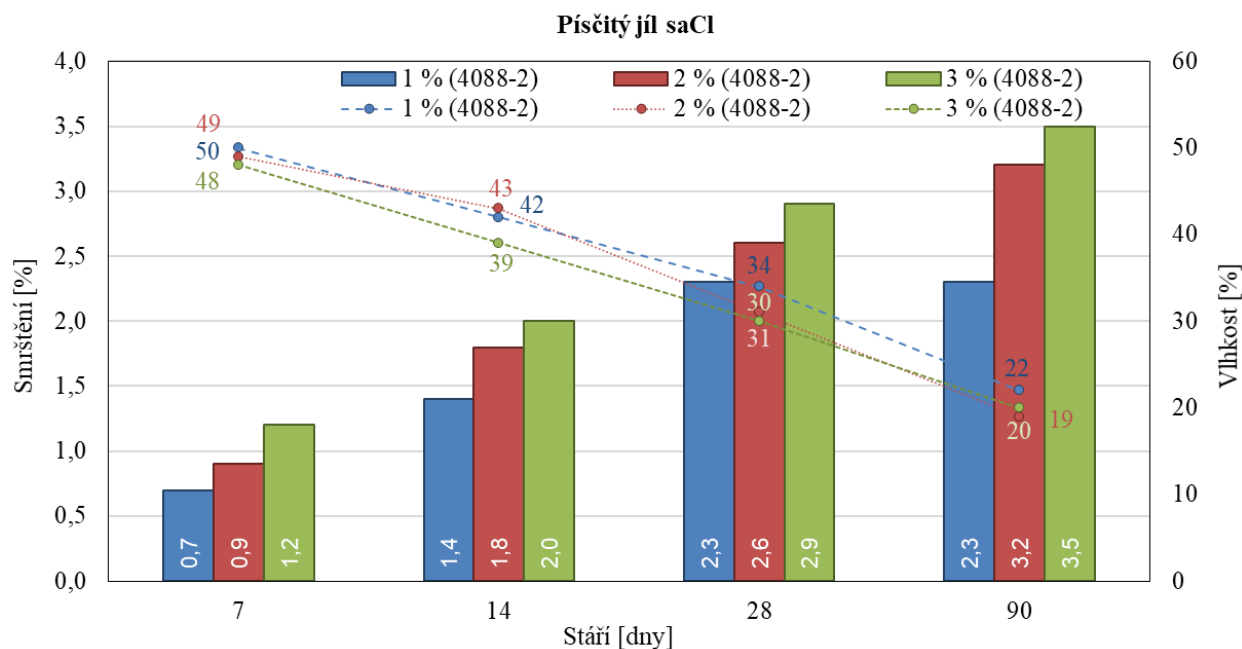
Příloha č. 26 l) Pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 8 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



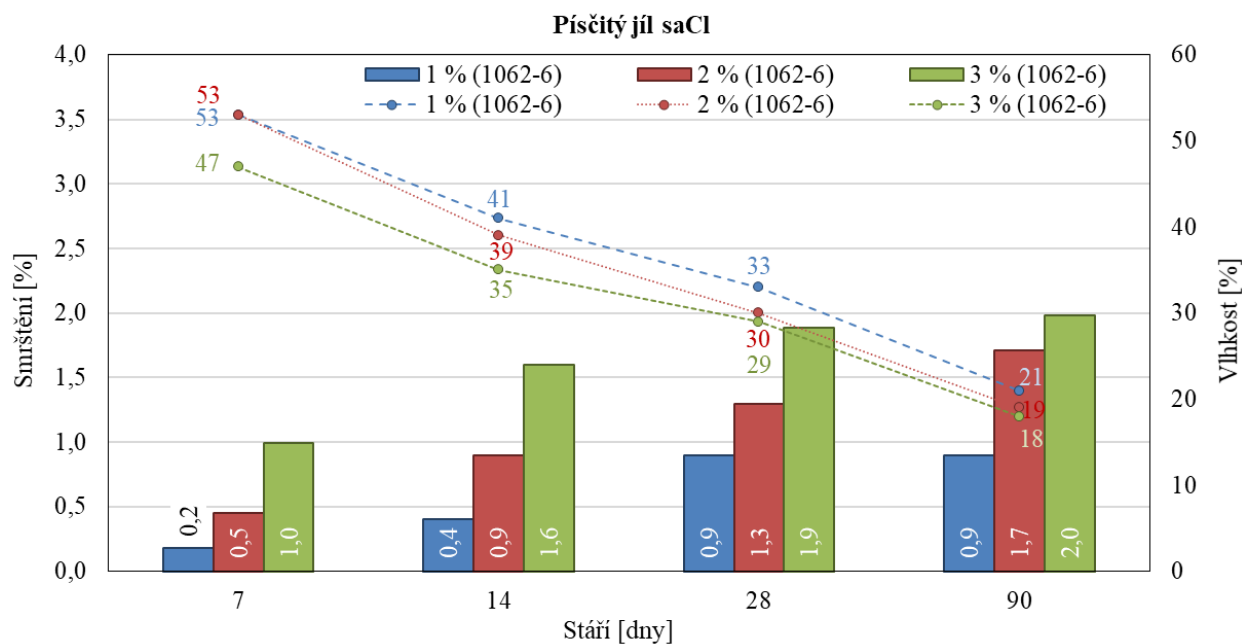
Příloha č. 26 m) Závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 21



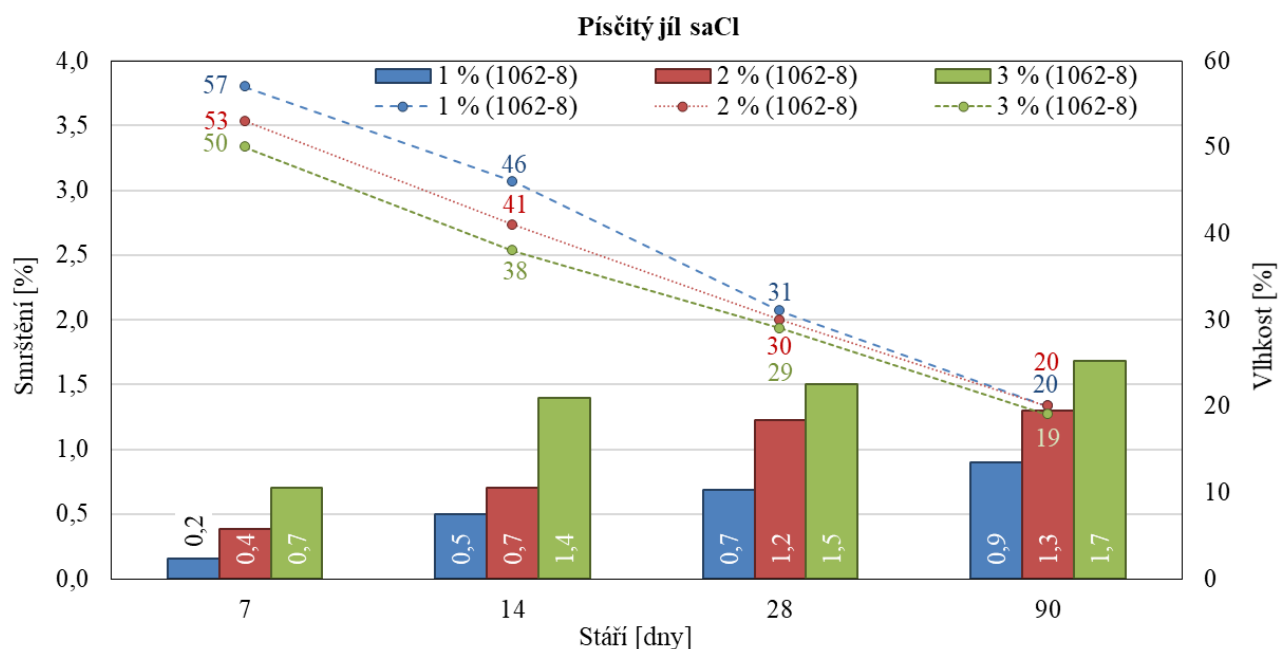
Příloha č. 26 n) Závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 2 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 4088



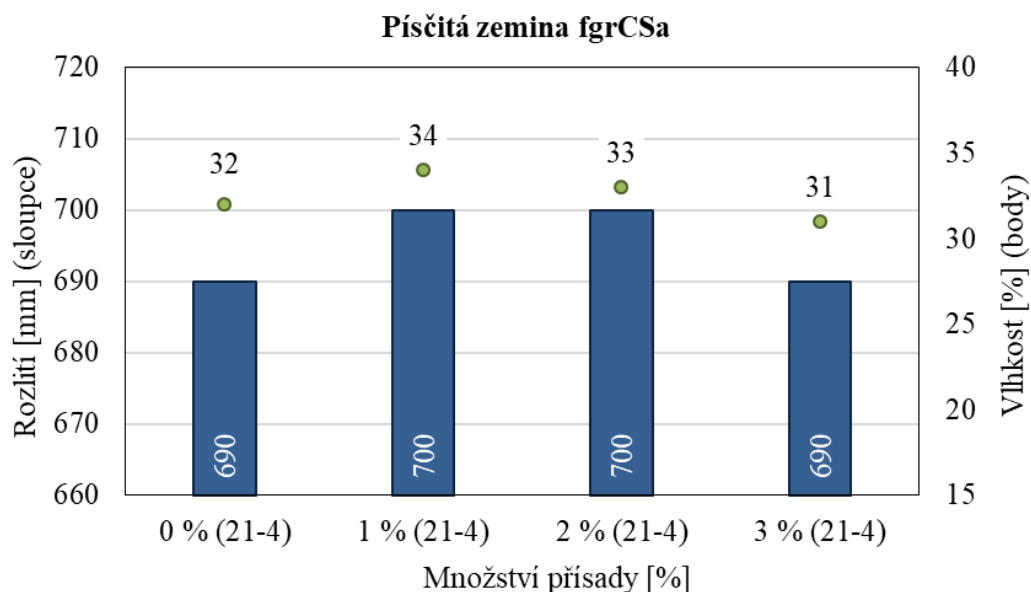
Příloha č. 26 o) Závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 6 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



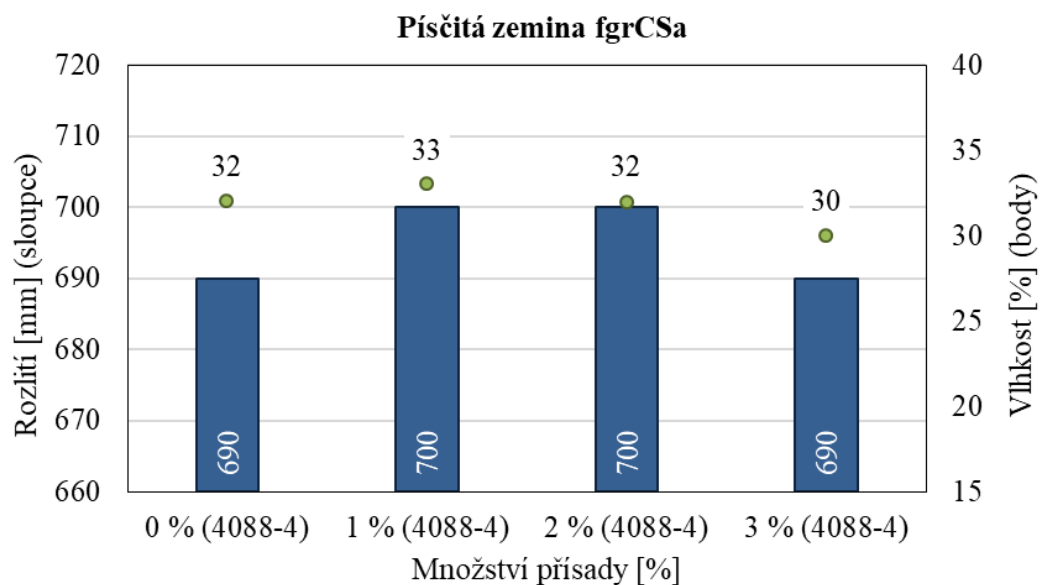
Příloha č. 26 p) Závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčitého jílu saCl, 3,0 % vápna, 8 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



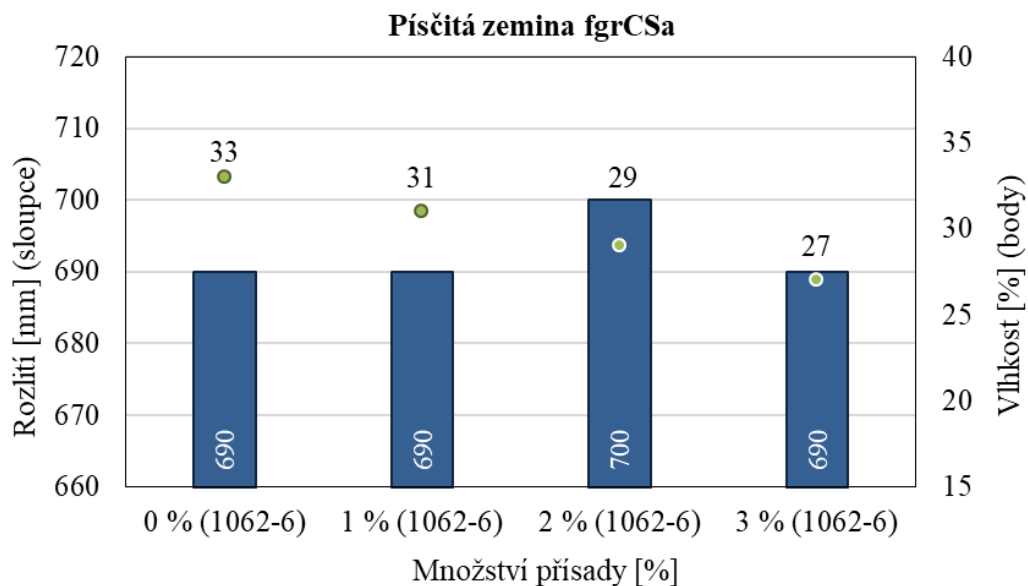
Příloha č. 27 a) Závislost rozliti na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % cementu a 0-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 21



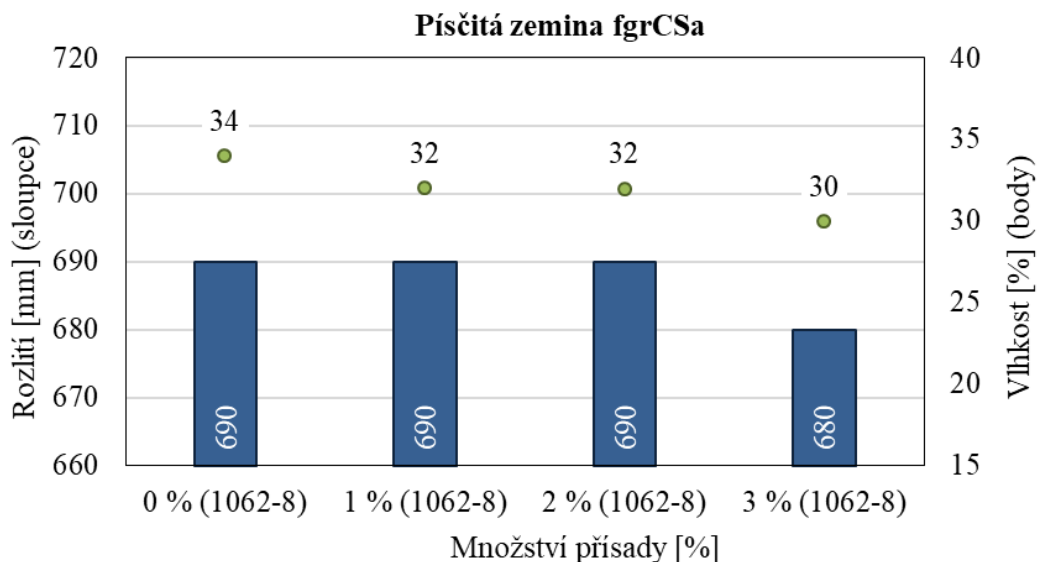
Příloha č. 27 b) Závislost rozliti na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % cementu a 0-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 4088



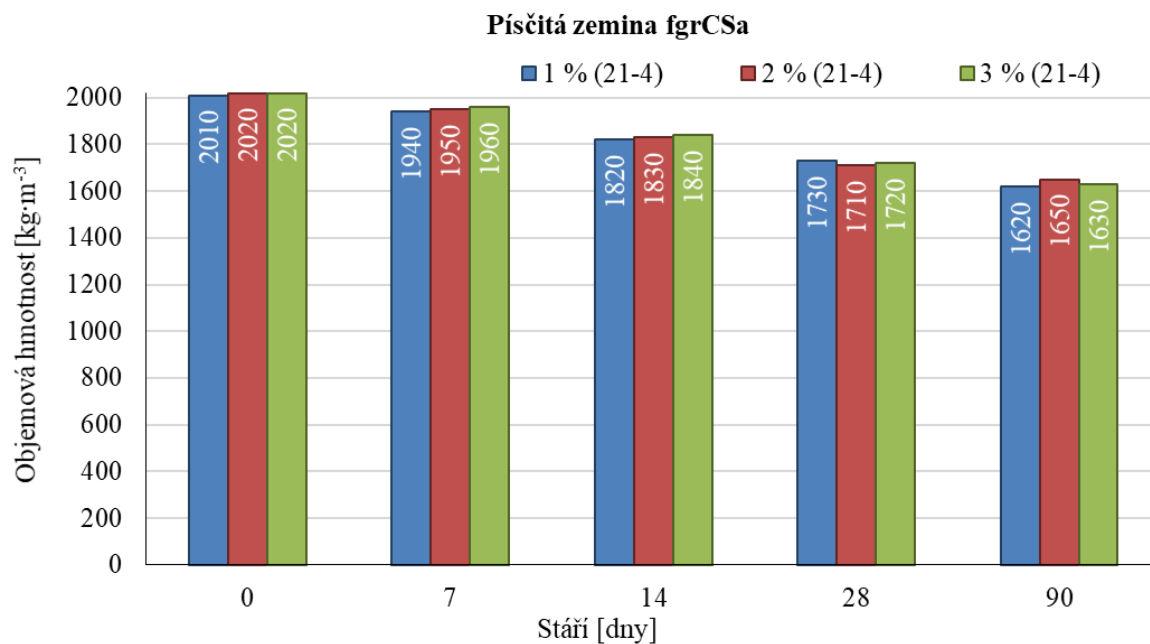
Příloha č. 27 c) Závislost rozliti na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 6 % cementu a 0-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



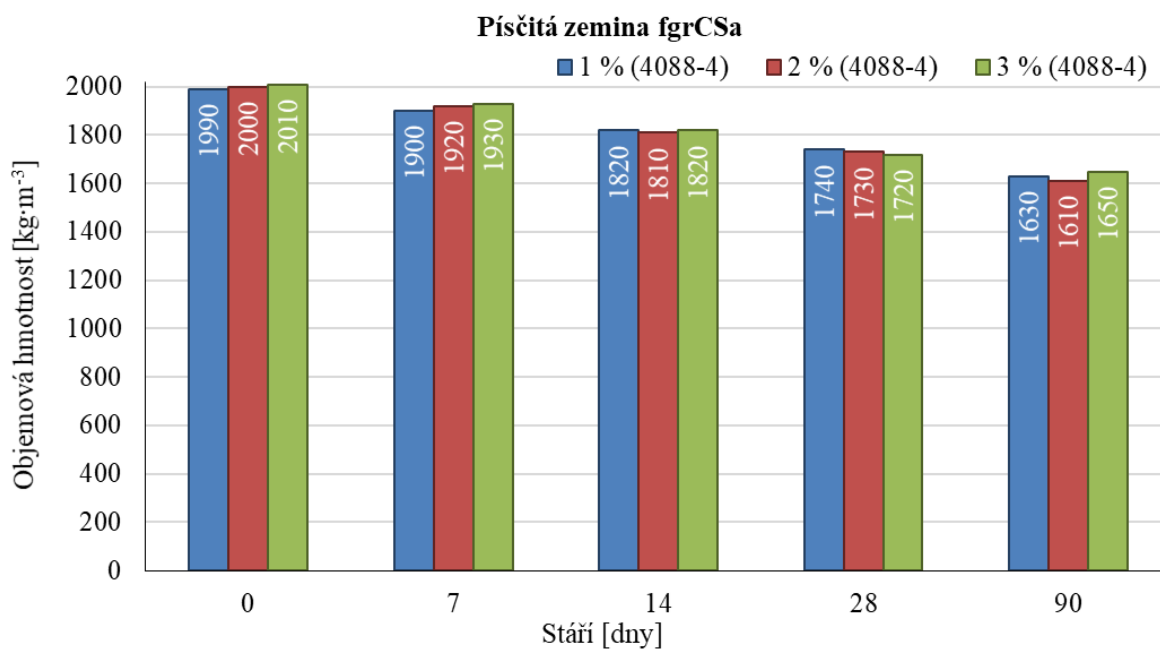
Příloha č. 27 d) Závislost rozliti na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 8 % cementu a 0-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



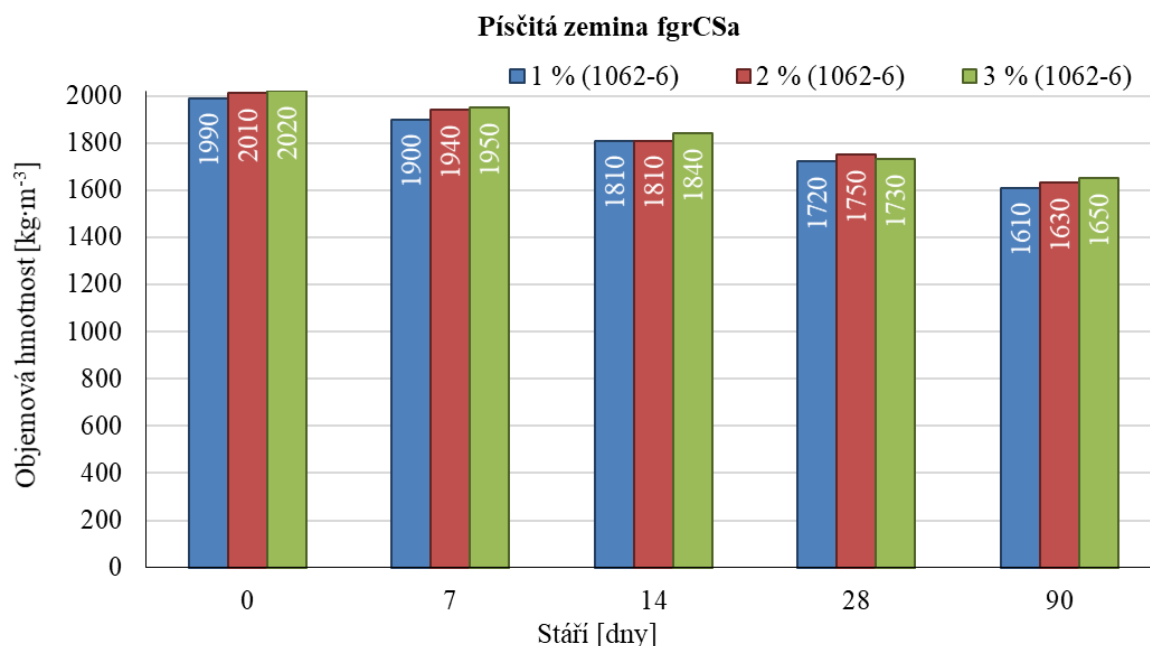
Příloha č. 27 e) Objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 21



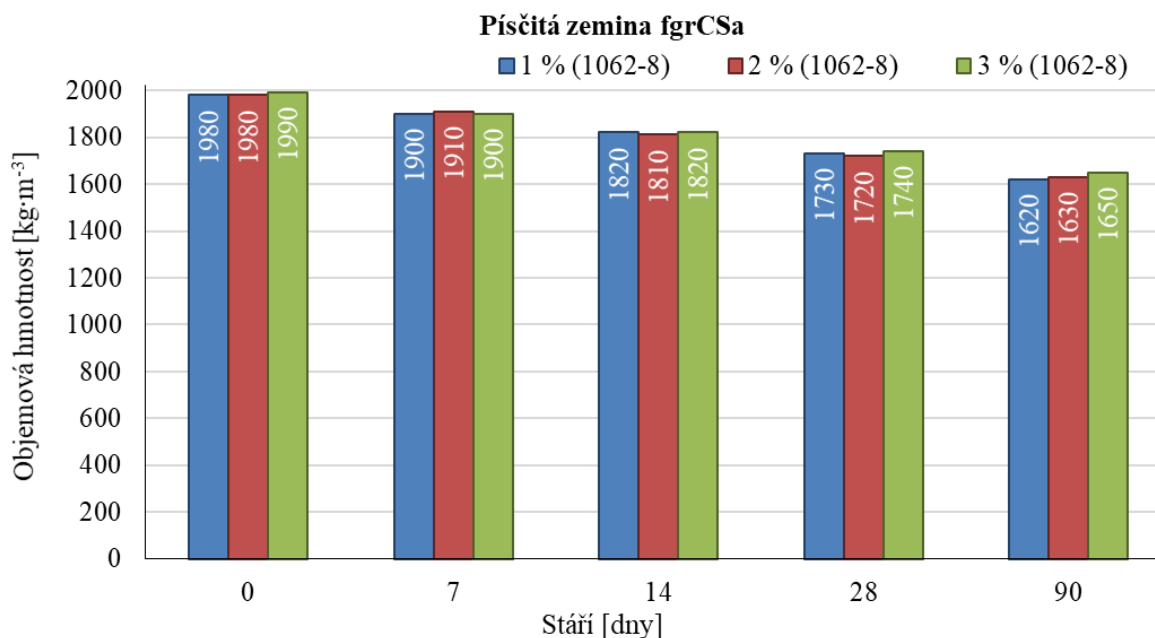
Příloha č. 27 f) Objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 4088



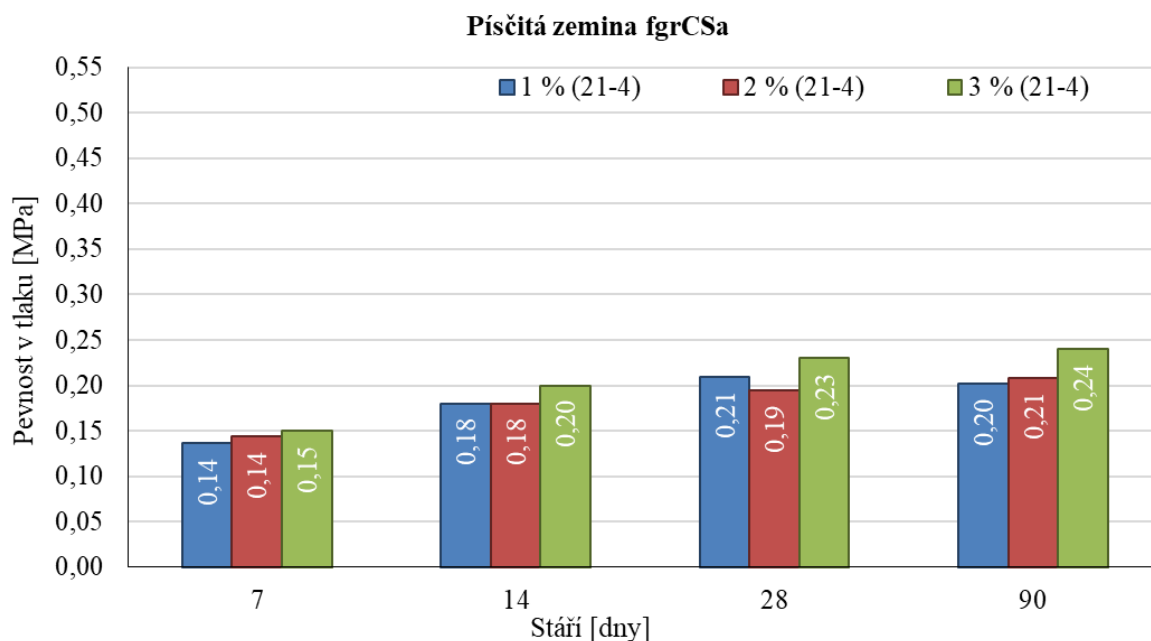
Příloha č. 27 g) Objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 6 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



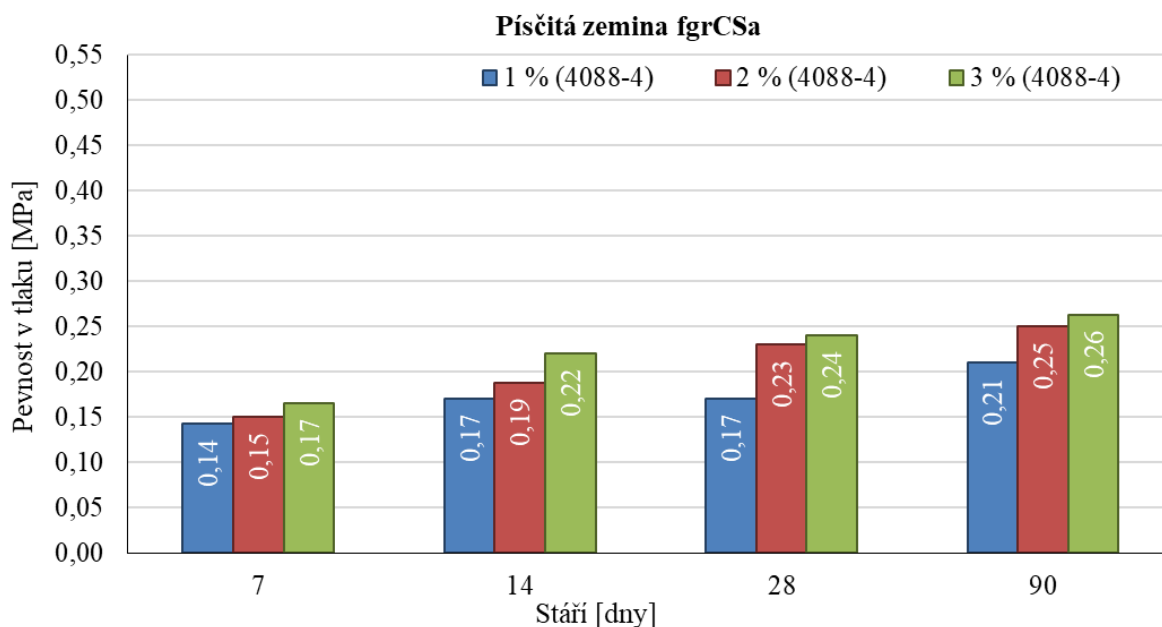
Příloha č. 27 h) Objemové hmotnosti na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 8 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



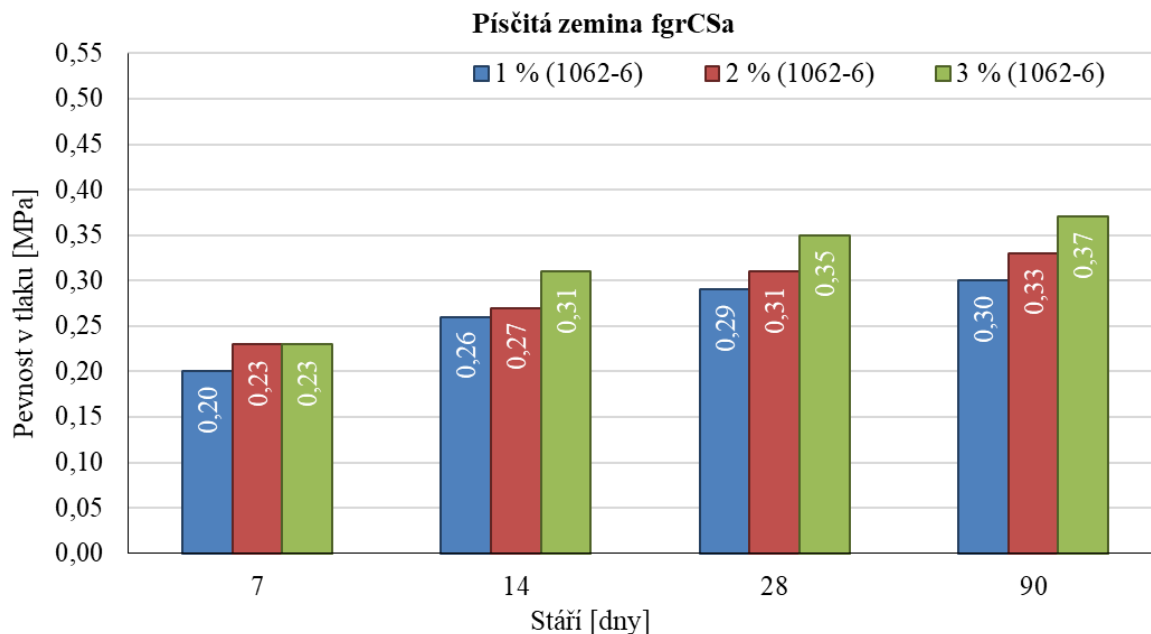
Příloha č. 27 i) Pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 21



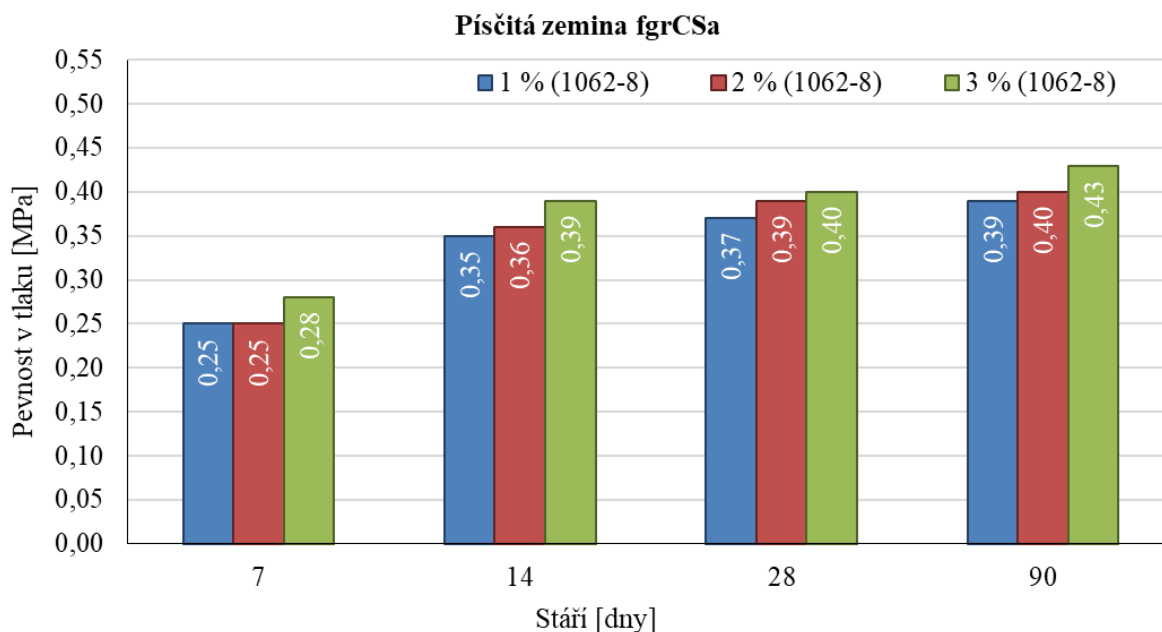
Příloha č. 27 j) Pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 4088



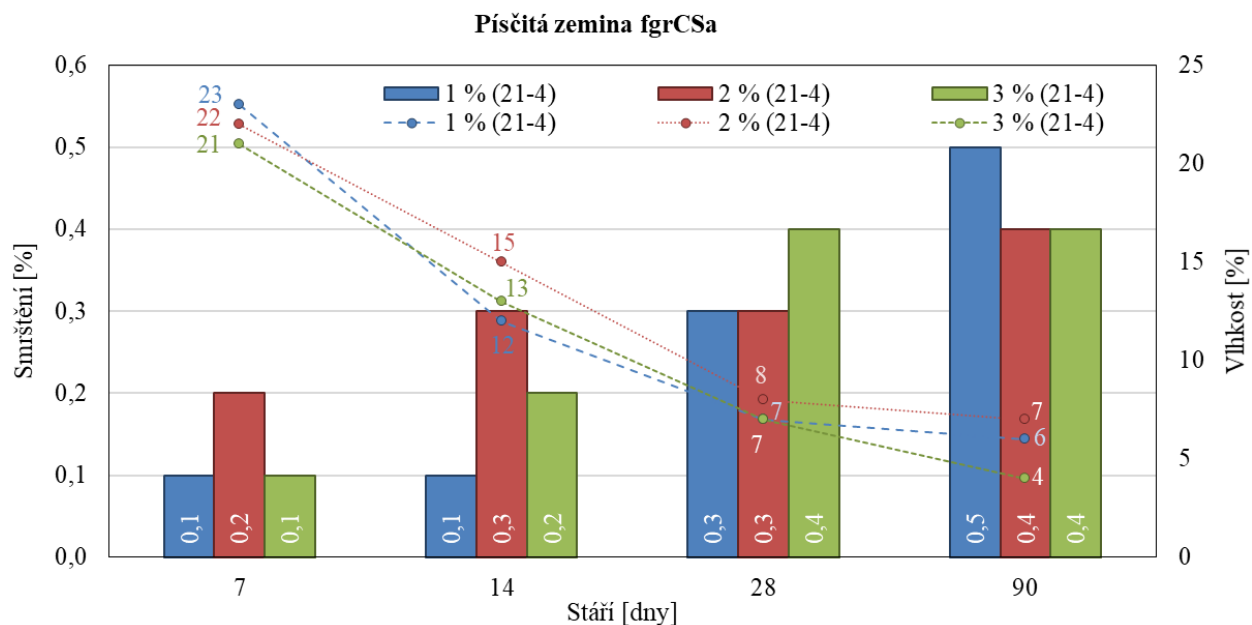
Příloha č. 27 k) Pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 6 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



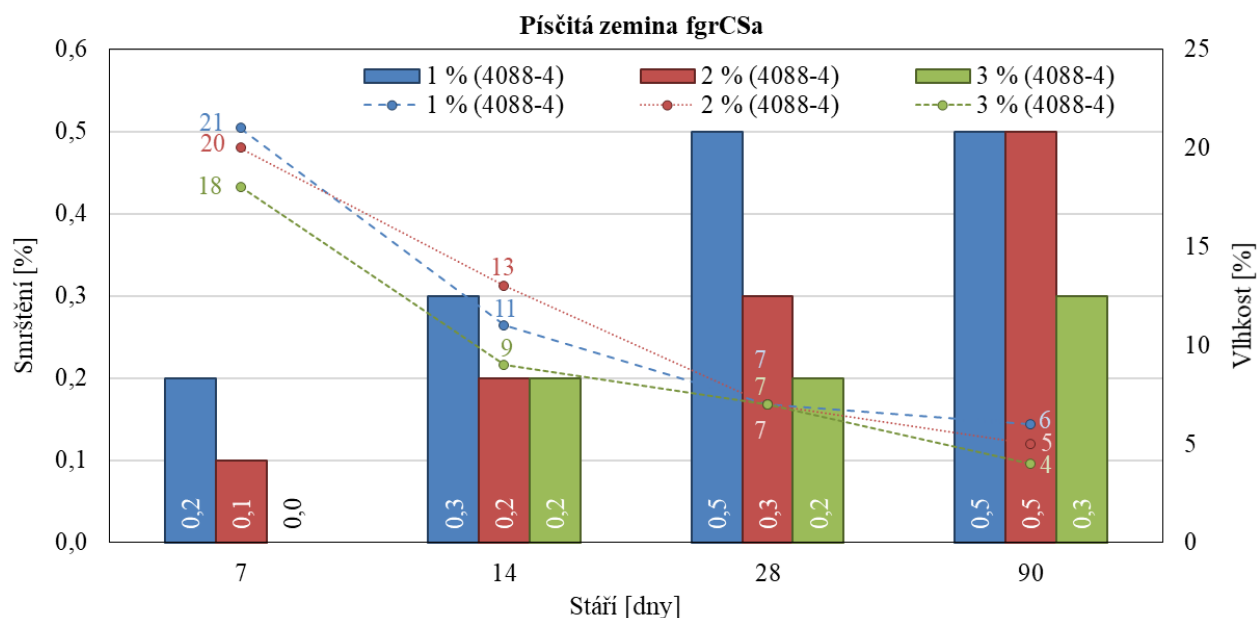
Příloha č. 27 l) Pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 8 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



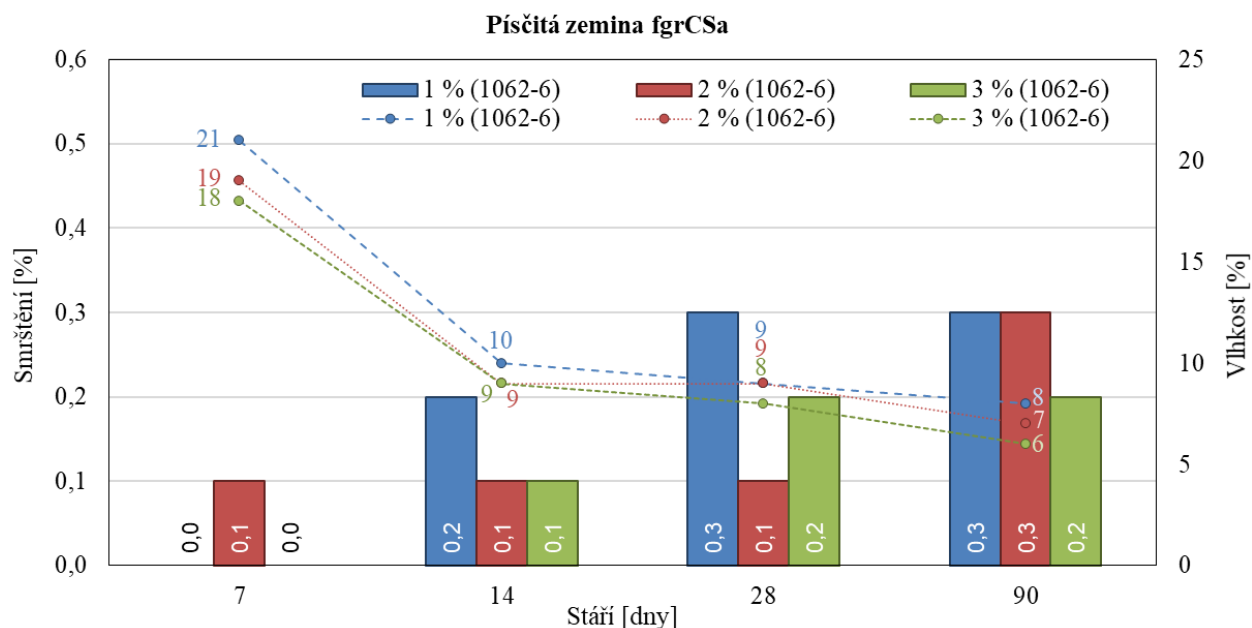
Příloha č. 27 m) Závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 21



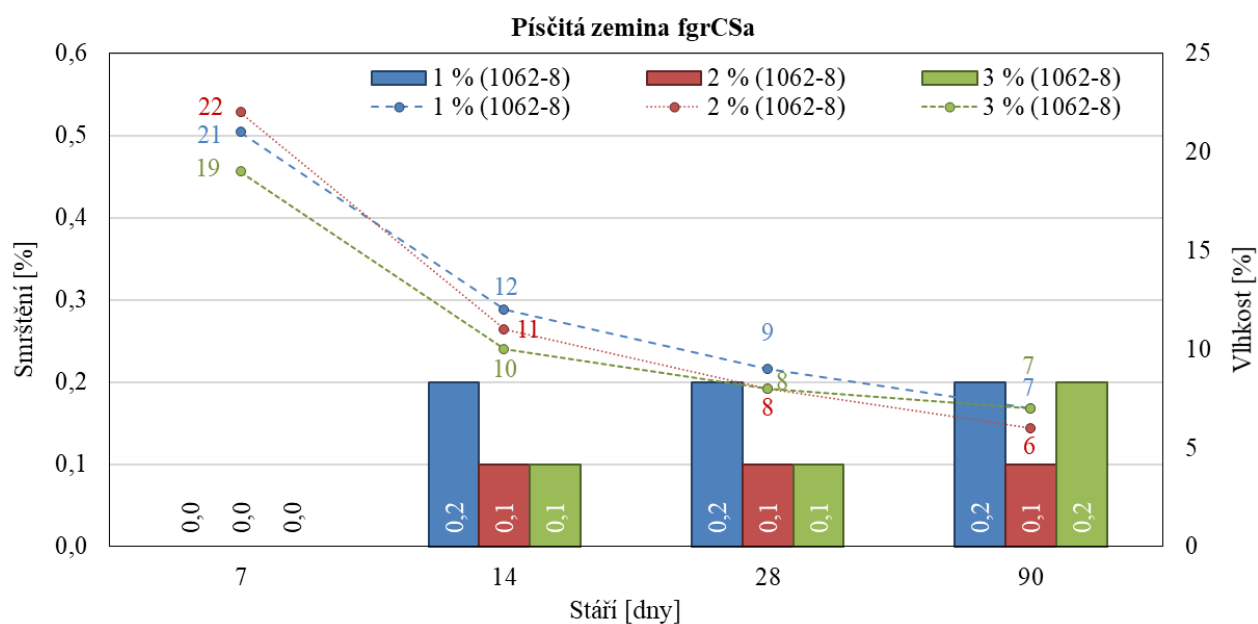
Příloha č. 27 n) Závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 4 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 4088



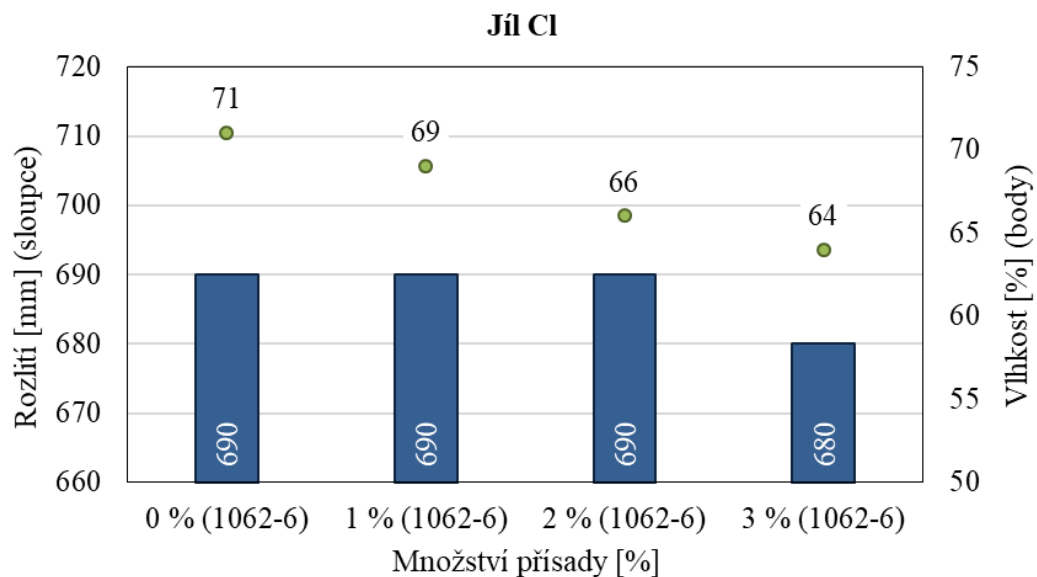
Příloha č. 27 o) Závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 6 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



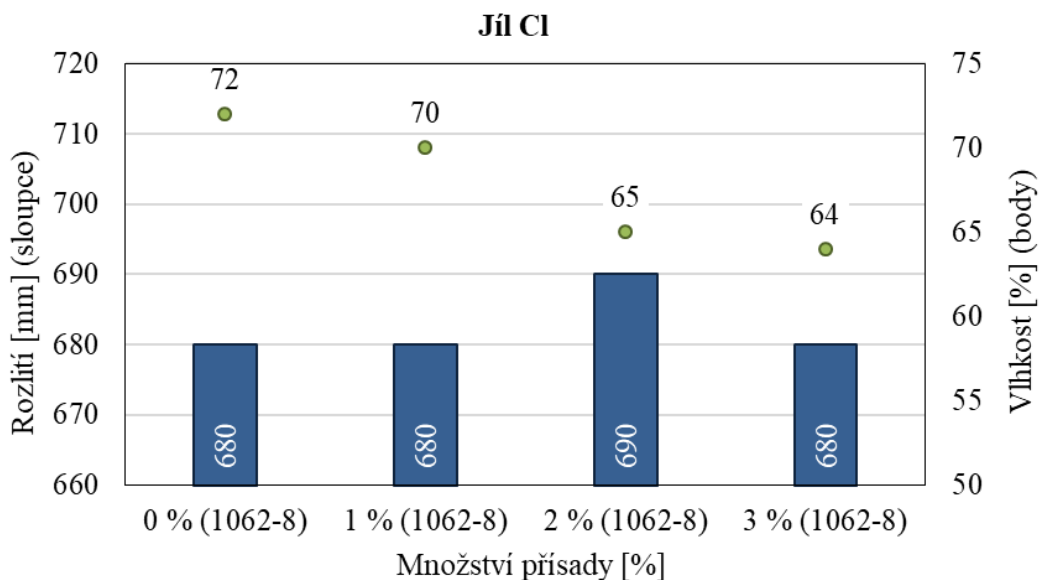
Příloha č. 27 p) Závislost smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi písčité zeminy fgrCSa, 1,5 % vápna, 8 % cementu a 1-3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



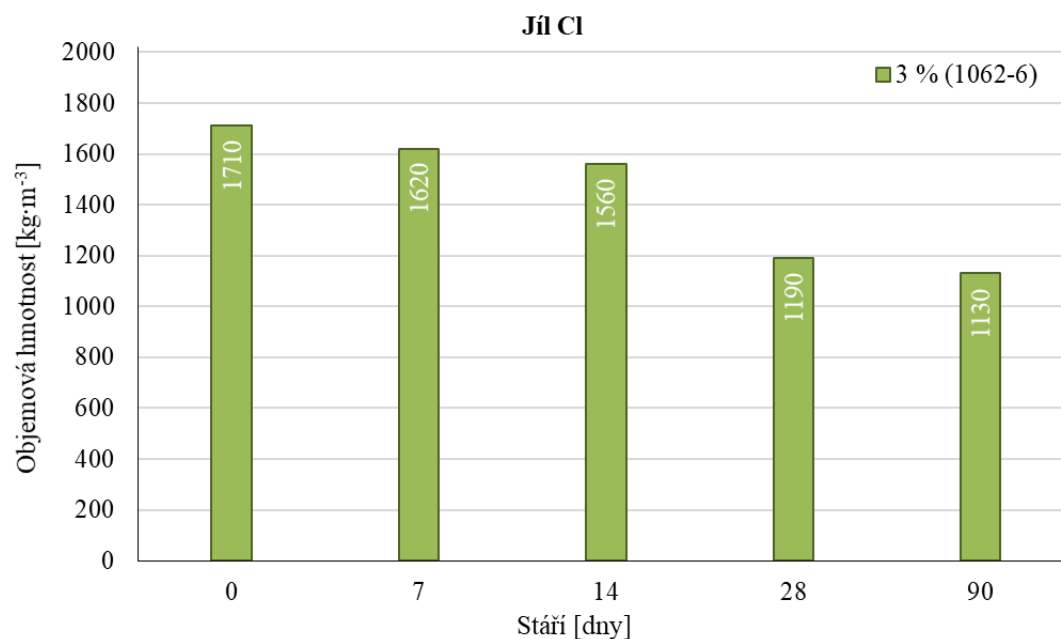
Příloha č. 28 a) Závislost rozlití na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi C1, 3,0 % vápna, 6 % cementu, 0–3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



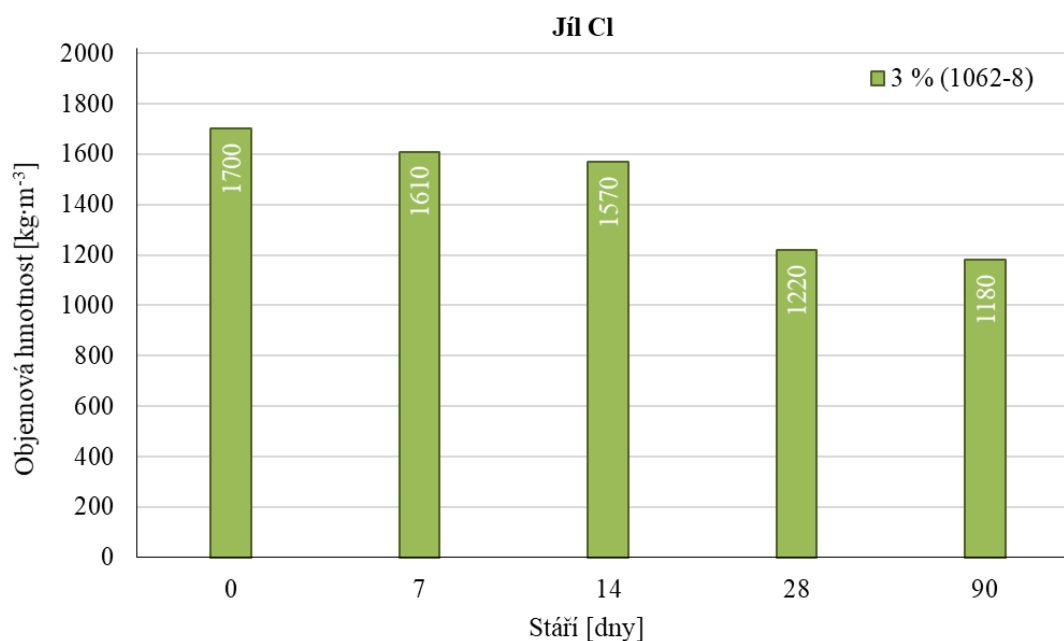
Příloha č. 28 b) Závislost rozlití na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi C1, 3,0 % vápna, 8 % cementu, 0–3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



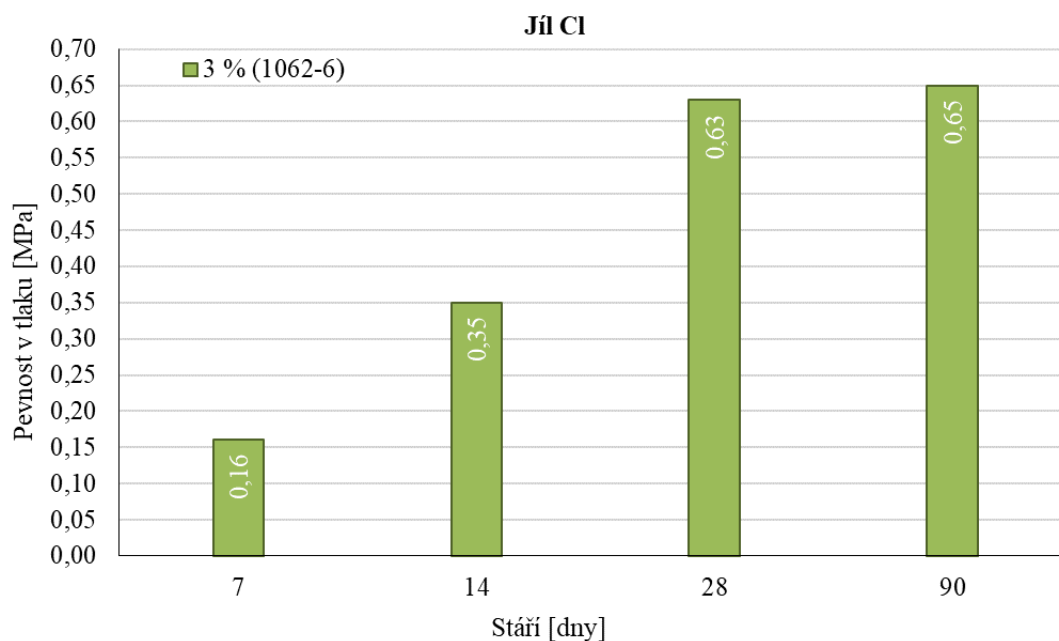
Příloha č. 28 c) Objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 6 % cementu, 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



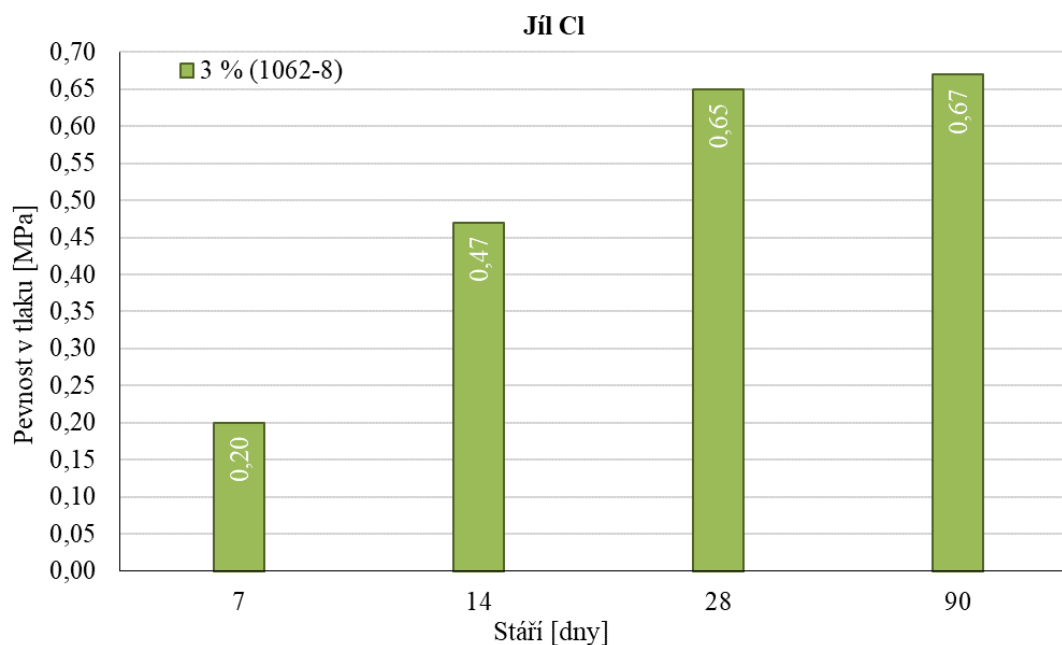
Příloha č. 28 d) Objemové hmotnosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 8 % cementu, 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



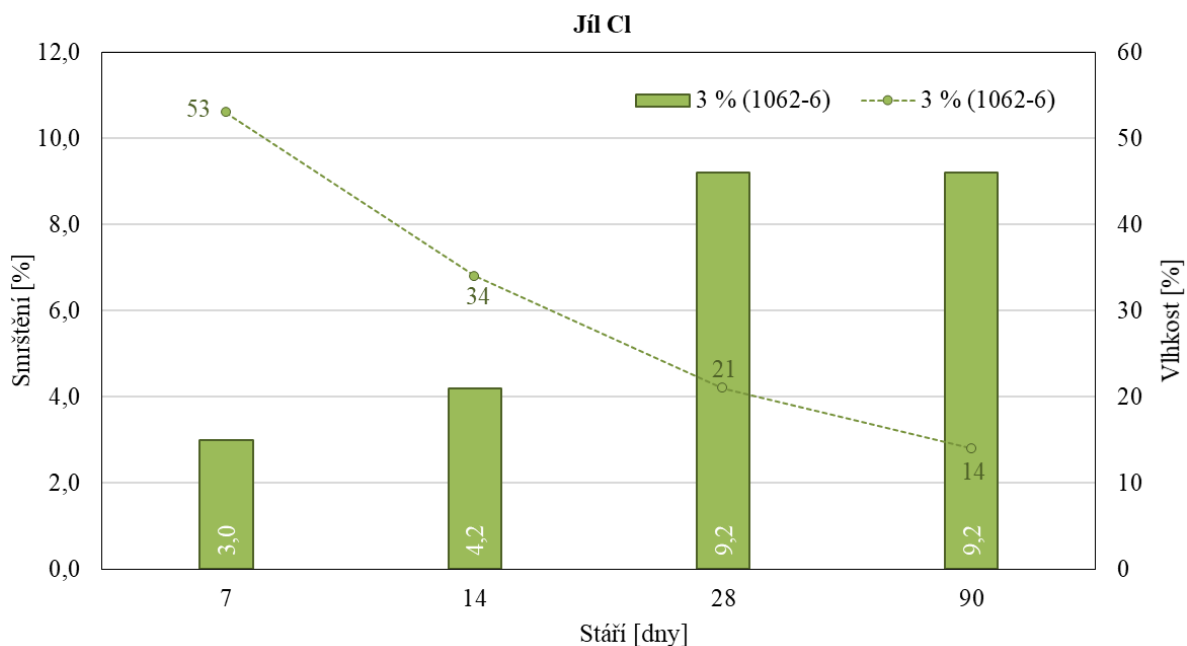
Příloha č. 28 e) Pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 6 % cementu, 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062



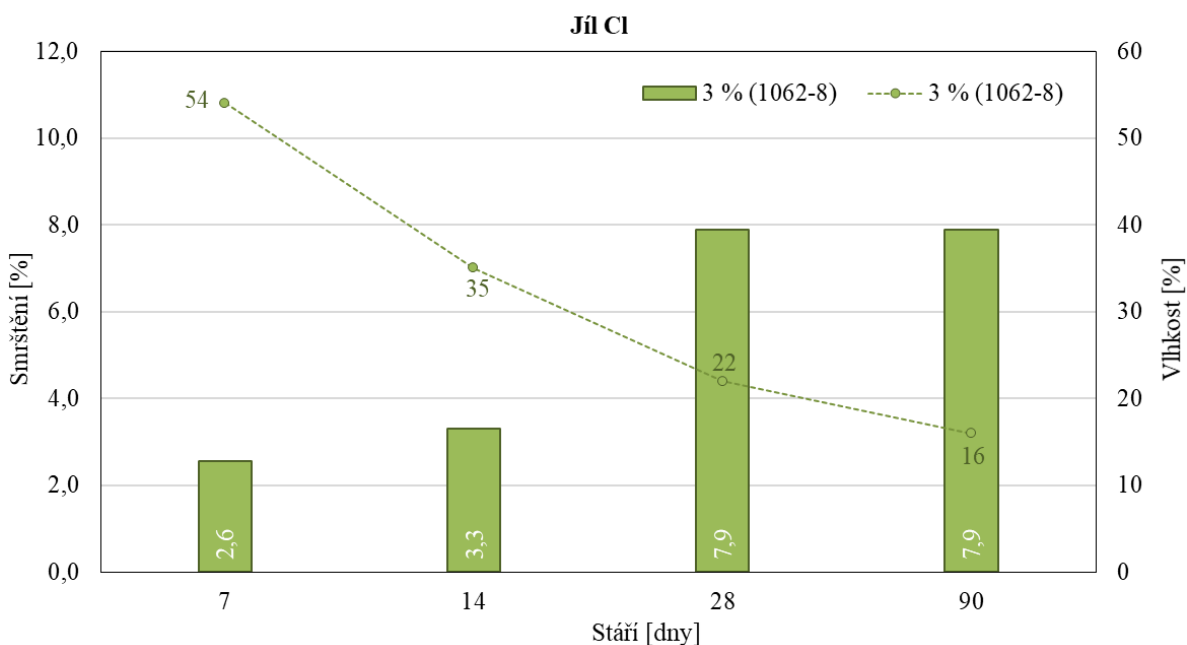
Příloha č. 28 f) Pevnosti v tlaku samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 8 % cementu, 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062

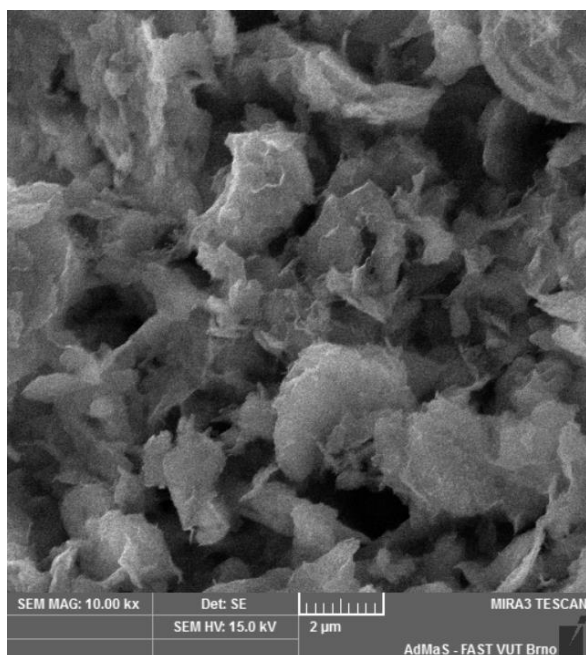


Příloha č. 28 g) Závislosti smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 6 % cementu, 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062

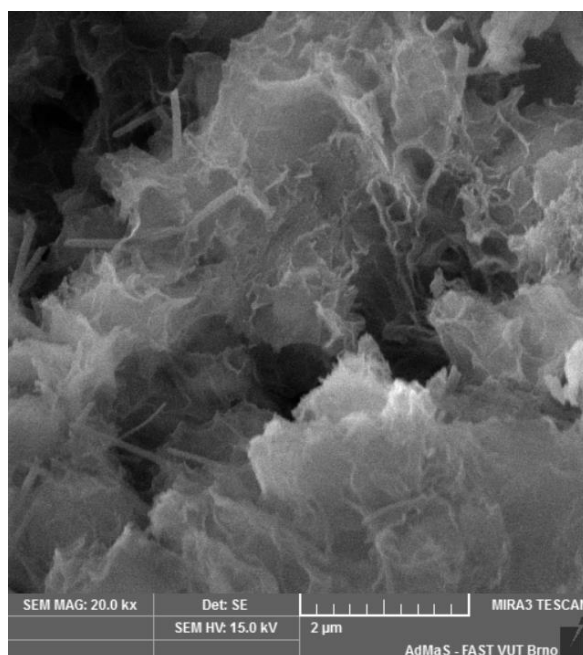


Příloha č. 28 h) Závislosti smrštění na vlhkosti samozhutnitelných zálivek na bázi jílu Cl, 3,0 % vápna, 8 % cementu, 3 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062

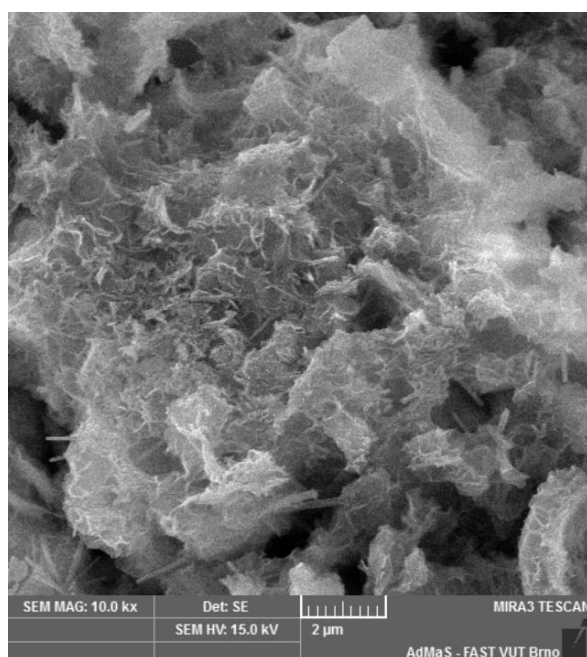


Příloha č. 29 Rastrovací elektronová mikroskopie vybraných samozhutnitelných zálivek

a) saCl, 3,0 % vápna,
4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R,
3,0 % Sika ViscoCrete 1062



b) saCl, 3,0 % vápna,
4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R,
0,08 % uhličitanu sodného



c) Jíl Cl, 3,0 % vápna,
4 % CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R,
0,08 % uhličitanu sodného